

Studijní program B 2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
Zaměření strojírenská metalurgie

Posouzení příčiny porušení svařovaného dílu

Assessment of the cause failure of welded part

Staněk Jaroslav
KSP – SM – B44

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Konzultant bakalářské práce: Ing. Lucie Vrábelová

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 51
Počet tabulek: 9
Počet obrázků: 50

Datum: 4. 1. 2013



ANOTACE

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Student: Jaroslav Staněk
Téma práce: Posouzení příčiny porušení svařovaného dílu

Číslo BP: KSP – SM – B
Vedoucí BP: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Konzultant BP: Ing. Lucie Vrábelová



Abstrakt:

Tato bakalářská práce řeší možné příčiny porušení svařovaného dílu metodou MAG. Práce je rozdělena do dvou částí teoretické a experimentální. Teoretická část obsahuje hlavní metody spojování tvářených dílů svařováním, možnosti svařování tvářených dílů z nerez ocelí, metody sledování struktur ocelí a mechanismy porušování. Cílem experimentální části bylo posoudit různé příčiny porušení dílu, na kterém vznikla prasklina. Experimentální část probíhala formou čtyř analýz, které byly přehledně zpracovány a díky kterým jsme v závěru zjistili, nebo vyvrátili možné příčiny porušení dílu.



Abstrakt:

This bachelor thesis solves possible causes failure of welded part by method MAG. The bachelor thesis is divided into two parts of the theoretical and experimental. The theoretical part contains the main methods of joining formed parts by welding, possibilities of welding formed parts made of stainless steel, methods for monitoring steel structures and mechanisms violations. The aim of the experimental part was to assess the various causes failure of welded part, which has penetrated the crack. Experimental part took place the form of four analyzes that were clearly processed and through them we found out or disproved the possible causes of failure part.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Jaroslav Staněk

studijní program

obor

B 2341 Strojírenská technologie

zaměření

Strojírenství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Posouzení příčiny porušení svařovaného dílu

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s hlavními metodami spojování tvářených dílů svařováním.
2. Zaměřte se na možnosti svařování tvářených dílů z nerez ocelí.
3. Proveďte rozbor možností identifikace porušení dílu kolem svaru.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.



Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 4. 1. 2013

.....
Jaroslav Staněk
Loukov 26
294 11 Loukov



Poděkování

Mé hlavní poděkování patří mé vedoucí práce Prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a konzultantce Ing. Lucii Vrábelové za jejich trpělivost, odborné vedení, připomínky a cenné rady při zpracování bakalářské práce a za čas, který mi obě věnovaly při konzultacích.



OBSAH

1.	ÚVOD	9
2.	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1.	Hlavní metody spojování tvářených dílů svařováním	10
2.1.1	Svařování v ochranné atmosféře netavící se elektrodou WIG	10
2.1.2	Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou MAG, MIG	13
2.2.	Možnosti svařování tvářených dílů z nerez ocelí	15
2.2.1	Martenzitické korozivzdorné oceli	16
2.2.2	Feritické korozivzdorné oceli	17
2.2.3	Austenitické Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) oceli	18
2.2.4	Austeniticko - feritické oceli	18
2.3.	Metody sledování struktur ocelí	18
2.3.1	Světelná mikroskopie	18
2.3.2	Faktory charakterizující metodiku světelné mikroskopie	19
2.3.3	Optické metody zviditelnění struktury	19
2.3.4	Příprava vzorků pro metalografické pozorování	20
2.4.	Mechanismy porušování	23
2.4.1.	Tvárné porušení	23
2.4.2.	Štěpné porušení	23
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1.	Úvod a cíl experimentální části	24
3.2.	Materiálová analýza	26
3.2.1	Použitý přístroj	26
3.2.2	Odebrání vzorků	28
3.2.3	Sledování chemického složení materiálu	29
3.2.4	Vyhodnocení	33
3.3.	Analýza svaru	33
3.3.1	Postup přípravy vzorků	33
3.3.2	Vyhodnocení vzorků	35
3.4.	Analýza mikrostruktury	37
3.4.1	Postup přípravy vzorků	37
3.4.2	Vyhodnocení vzorků	38
3.5.	Analýza části lomové plochy	40
3.5.1	Postup přípravy vzorků	40
3.5.2	Vyhodnocení vzorků	41
4.	ZÁVĚR	44
5.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
6.	PŘÍLOHA	47



1. ÚVOD

Obloukové svařování se začalo vyvíjet od počátku devatenáctého století po objevu fenoménu elektrického oblouku nezávisle na sobě Angličanem Davyem Humphreym (1801) a Rusem Vasilijem Petrovem (1803). V roce 1808 předvedl Davy Humphry hoření elektrického oblouku v Royal Institute v Anglii. Název elektrický oblouk však vznikl až později. Jeho objev se stal podkladem pro vývoj obloukového svařování. První svarový spoj elektrickým obloukem byl proveden dalším ruským vynálezcem N. N. Bernardosem a S. Olzewskim v roce 1881 a v roce 1885 byl patentován ve Velké Británii, Belgii, Francii, Německu a Švédsku a v roce 1887 v Rusku a USA, [11]. Ukázka patentové listiny z roku 1987 je v příloze na obr. P1.

Svařování elektrickým obloukem je velmi používaný způsob tavného svařování. Zdrojem tepla k natavení základního a přídavného materiálu je elektrický oblouk, který se vyznačuje vysokou tepelnou energií. Z fyzikálního hlediska je elektrický oblouk samovolný elektrický výboj v plynném prostředí s vysokou teplotou za pomoci stejnosměrného nebo střídavého proudu. Elektrický oblouk se zapaluje buď přerušením zkratu nebo vysoce napětovou jiskrou, která ionizuje plyn a tak ho vytváří vodivým. Ke svařování obloukem se řadí mnoho metod, jež se liší druhem elektrody, prostředím, ve kterém hoří oblouk, [1].

Postupem času, vedle svařování obalenou elektrodou, byly vyvinuty další způsoby, tzv. svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. Při tomto způsobu svařování hoří elektrický oblouk mezi elektrodou (tavící se nebo netavící se) a základním materiálem. Kolem elektrody se do prostoru svarové lázně přivádí ochranná atmosféra (inertního nebo aktivního plynu). Tím je svarová lázeň a část vytvářené svarové housenky chráněna před nepříznivými účinky vzduchu, [2].

S použitím svařování v ochranných atmosférách je spojeno i řešení mé bakalářské práce, jejímž úkolem je porušení dílu zhotoveného metodou MAG.



Obr. 1.1 Davy Humphry (1778-1829)



Obr. 1.2 Nikola Nikolajevič Bernardos (1848-1905)



2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

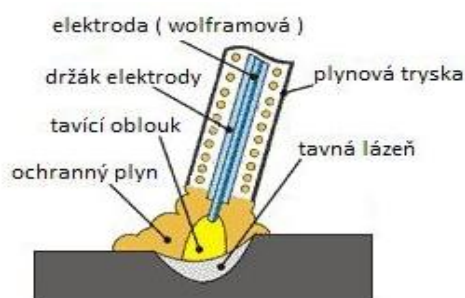
2.1 Hlavní metody spojování tvářených dílů svařováním

Pod pojmem svařované díly, které jsou zahrnuty do této kapitoly, jsou namysli díly, které jsou vyrobeny především metodami svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. Jejich výhody proti ostatním metodám jsou především vysoká produktivita, možnost svařovat ve všech polohách, velké možnosti robotizace a automatizace a v neposlední řadě také lepší hygiena prostředí.

Při tomto způsobu svařování je svarová lázeň chráněna ochrannou atmosférou před nepříznivými účinky okolní atmosféry (hlavně kyslíku a dusíku). Může být inertní nebo aktivní. Inertní atmosféry nevstupují do chemických reakcí se svarovou lázní. Pro tyto účely se používá argon (Ar), helium (He) nebo jejich směs. Aktivní atmosféry se podílejí na chemických reakcích ve svarové lázni, jejich škodlivé působení je však kompenzováno vhodným složením přídavného materiálu, [2].

2.1.1 Svařování v ochranné atmosféře netavící se elektrodou WIG

Tento způsob je označován jako WIG (Wolfram-Inert-Gas), nebo TIG (Thungsten-Inert-Gas) označení 141. Způsob je universální a používá se jak pro ruční, tak i pro automatické svařování. Hodí se nejen ke svařování tvářených korozivzdorných dílů, ale také hliníkových slitin, slitin mědi a i jiných vysokolegovaných ocelí.



Obr. 2.1 Schéma hořáku [13]



Obr. 2.2 Svařovací agregát WIG (TIG) [13]



Svarová lázeň je chráněna před účinky atmosféry argonem nebo heliem, který je přiváděn podél wolframové elektrody a usměrňován do místa svaru hubicí. Přídavný drát je dodáván do oblouku podávacím mechanismem, ručně ve formě drátu, nebo pásku. Oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, jeho délka je regulována napětovou regulací.

Charakteristika a rozsah použití:

Poloha svařování	všechny polohy
Tloušťka základního materiálu	0,5 až 10mm
Druh základního materiálu	všechny druhy ocelí, včetně legovaných, slitiny Ni, Cu, Al, Ti, Ag, Zr
Svařovací proud	10 až 400 A
Druh proudu	střídavý pro Al a jeho slitiny, stejnosměrný pro ostatní materiály (elektroda minus pól)
Průměr elektrody	1 až 8 mm
Chlazení hořáku	do 150 A plynem, nad 150 A kapalinou (vodou)
Statická charakteristika zdroje	strmě klesající
Zapalování oblouku	vysokofrekvenčním výbojem
Ochranný plyn	argon, helium, jejich směs

Při svařování střídavým proudem vzniká zvláště při nižších proudech nestabilita oblouku, která způsobuje defekty ve svarech, popřípadě zcela znemožňuje svařování. Proto je nutno oblouk stabilizovat. Používají se dva druhy stabilizace:

- *vysokofrekvenčním vysokonapětovým generátorem*, který indukují do svařovacího obvodu proud o napětí 2 500 až 5 000 V, o frekvenci 2 až 5 MHz,
- *pulsním generátorem s nízkou frekvencí*.

Při svařování střídavým proudem vzniká také usměrňovací efekt. Nepříznivá stejnosměrná složka se omezuje kondenzátorovou baterií. Při svařování stejnosměrným proudem s přímou polaritou (elektroda minus pólu) se na elektrodě vyvíjí kolem třetiny tepla a asi dvě třetiny na základním materiálu. Elektroda se ohřívá na teploty 3 000 až 3 500 °C, oblouk hoří stabilně a klidně, vzniká hluboký úzký závar.

Pro svařování WIG stejnosměrným proudem se velmi často setkáme také s použitím impulsního svařování. Přináší výhody v docílení pravidelné hloubky provaření, v lepším ovládnutí svarové lázně polohách a ve vytváření pravidelné kresby svaru. Používají se tyto druhy modulace proudu :

- dlouhými pulsy, od 1 do 10 sekund, pro tloušťky materiálu 4 až 6 mm,
- pulsy s frekvencí 1 až 100KHz, pro tloušťky materiálu 3 až 6 mm,
- pulsy s frekvencí 1 až 20 MHz, pro svařování malých tlouštěk 0,2 až 0,8 mm,



Pro svařování se používají elektrody wolframové a wolframové s přísadou 1 až 2% thoria, které snesou vyšší proudové zatížení a mají pracovní teplotu až o 1 000 °C nižší než wolframové (thorium snižuje emisní energii). Velmi důležitá je úprava konce elektrody. Pro svařování stejnosměrným proudem se elektrody upravují do kužele. Čím je ostřejší úhel, tím, se dosáhne většího zúžení oblouku a hlubšího průvaru.

Pro svařování potrubí se používají speciální automatické oběžné hlavy. Celý svařovací cyklus je možno programovat. Během svařování dochází k ohřevu svařovaného materiálu, proto je nutno snižovat svařovací proud. Doporučené svařovací parametry pro různé tloušťky materiálů jsou uvedeny v tabulce 2-1. Menší tloušťky se svařují bez přídavného materiálu roztavením hran, [2].

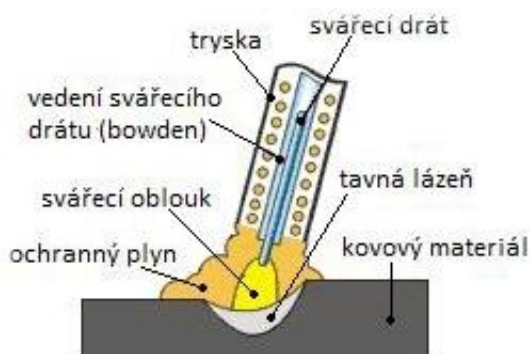
Tabulka 2-1 Svařovací parametry pro svařování WIG [2]

Korozivzdorná ocel					
Tloušťka materiálu (mm)	Svařovací proud (A)	Průměr elektrody (mm)	Přídavný materiál (mm)	Ochranný plyn (l / min)	Svařovací rychlost (m / min)
0,9	100 až 160	1,6	0,8	7	0,9
1,2	120 až 180	1,6	0,8	7,5	0,75
1,6	140 až 200	1,6	0,8	7,5	0,6
2,0	150 až 225	2,4	1,2	8	0,5
3,0	200 až 230	2,4	1,2	8	0,3



2.1.2 Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou MAG, MIG

Tyto způsoby svařování jsou označeny MAG (Metal-Active-Gas) označení 135, při použití aktivních plynů (CO₂, směsné plyny) a MIG (Metal-Inert-Gas) označení 131, při použití inertních plynů (argon, helium). Elektrický oblouk hoří mezi holým přídavným drátem a základním svařovaným materiálem.



Obr. 2.3 Schéma hořáku [12]



Obr. 2.4 Svařovací agregát MAG, MIG [12]

Charakteristika a rozsah použití : [2]

Poloha svařování	všechny polohy
Tloušťka základního materiálu	0,8 až 40mm
Druh základního materiálu	MAG: nelegované a nízkolegované oceli MIG: vysokolegované oceli, slitiny Al, Ni, Cu
Přenos přídavného materiálu	zkratový: $I_s = 40$ až 190 A, $U_{EO} = 16$ až 21 V, Sprchový: $I_s = 120$ až 500 A, $U_{EO} = 20$ až 36 V,
Druh proudu	stejnsměrný, elektroda na plus pólu
Průměr přídavného drátu	0,8 až 2,6 mm

Metoda MIG je produktivnější než metoda WIG. U svařování metodou MIG tvoří elektrodu přídavný materiál (stejného nebo podobného složení jako základní materiál), který je ve formě drátu. Drát je navinut na cívce a podáváný podávacím mechanismem do svařovací hubice.

Způsob svařování MAG je téměř shodný s metodou MIG. Metody se liší hlavně druhem použité ochranné atmosféry, konstrukčními úpravami svařovacího zařízení a v drobných odchylkách regulačního systému. Zde mohou být dva základní typy přenosu svarového kovu do lázně (zkratový a bezzkratový).



Přenos zkratový (typický pro svařování v atmosféře CO₂). Konec narůstající kapky se dotkne svarové lázně dříve, jak se kapka oddělí od elektrody nastává zkrat. Po jejím odtrhnutí se proces opakuje.

Přenos bezzkratový je typický pro svařování ve směsích plynů. Kapky svarového kovu jsou velmi malé, čímž nedochází ke zkratu.

Pro tyto způsoby svařování se používají vysoké proudové hustoty 100 až 400 A·mm⁻². Proto se dosahuje vysokých svařovacích rychlostí a výkonů. Ochranná atmosféra se volí podle druhu svařovaného materiálu, ovlivňuje však přenos materiálu, rozstřík a teplotní poměry v oblouku. Přehled používaných ochranných atmosfér je v tabulce 2-2.

Tabulka 2-2 Přehled ochranných plynů pro svařování [2]

Ochranné plyny používané pro svařování WIG, MIG, MAG	
Druh a složení plynů	Použití
Ar	WIG, MIG, neželezné kovy, vysokolegované oceli
CO ₂	MAG, nízkouhlíkové oceli
Ar + 0,5% O ₂	Svařování hliníku a jeho slitin snižuje pórovitost
Ar + 1,0% O ₂	Korozivzdorné oceli, žárovevné žáruvzdorné, snižuje viskozitu svarové lázně, lepší přechod svaru, Cu a slitiny
Ar + 3,0% O ₂	Nelegované, nízkolegované a jemnozrnné oceli
Ar + 5,0% O ₂	Svařování ocelí s vyšším obsahem Si
Ar + 15 až 20% CO ₂	Nelegované a nízkolegované oceli, oceli s vyšším obsahem C, klidné hoření oblouku, lepší tvarování povrchu svaru
Ar + 5 až 10% H ₂	Vysokolegované oceli, pro automatizované svařování, vysoká teplota svarové lázně
	Slitiny Al bez Mn
Ar + 0,2 N ₂	Plazmové svařování, Cu, Ni, vysokolegované oceli
Ar + 5 až 7% H ₂	Svařování dezoxidované Cu
Ar + 15% až 20% N ₂	Nízkouhlíkové oceli, nízký rozstřík
Ar + 15% CO ₂ + 5% O ₂	Nízkouhlíkové oceli, dobrý povrchový vzhled svaru
Ar + 5% CO ₂ + 2% O ₂	Vysokolegované oceli, hluboké provaření
Ar + 20% He + 3% CO ₂	

Pro svařování se používají svařovací poloautomaty nebo automaty. Dobré operativní vlastnosti (možnost svařovat ve všech polohách) a možnost rychlé změny svařovacích parametrů podle programu jsou nezvratnými výhodami této metody. Navíc vytvářejí předpoklady pro použití těchto způsobů ve spojení se svařovacími roboty.

U zařízení pro svařování MIG a MAG se nenastavuje svařovací proud, ale délka oblouku prostřednictvím napětí na oblouku. Požadovaná velikost svařovacího proudu se nastaví rychlostí podávání drátu.



Při svařování v ochranných atmosférách vznikají ztráty kovu rozstříkem, které při nevhodně stanovených parametrech mohou dosáhnout vysokých hodnot a zcela znehodnotit ekonomické přínosy a produktivitu těchto způsobů svařování (nutnost odstraňování rozstříku z povrchu svařence). Za vyhovující se pokládají ztráty rozstříkem do 10%, [2].

2.2 Možnosti svařování tvářených dílů z nerez ocelí

Korozivzdorné oceli patří mezi konstrukční kovové materiály, které mají široké využití v průmyslu. Vyznačují se typickým chemickým složením a obsahují zpravidla více než 12 % Cr (až 30 %), dále legující prvky, hlavně Ni (až 30 %), Mn (až 24 %) , Mo, Cu a další, jako Si, Al, Ti, Nb, Ta, W, V a N, nejvýše do několika %. Charakteristické jsou nízké obsahy S a P, většinou max. 0,03 %. Obsah uhlíku je také nízký obvykle v rozmezí 0,01 - 0,1 %, u martenzitických korozivzdorných ocelí se zvyšuje na 0,2 - 1,0 %. Korozivzdorné oceli patří do skupiny ušlechtilých legovaných ocelí, u nichž je zaručováno přesné chemické složení, speciální podmínky výroby a specifické podmínky zkoušení. Vyrábějí se jako tvářené, lité a vyrobené práškovou metalurgií, [7].

Korozivzdorné oceli se rozdělují podle struktury do těchto skupin [7]:

- martenzitické
- feritické
- austenitické
- dvoufázové (duplexní) - austeniticko-feritické, martenziticko-feritické, martenziticko-austenitické
- precipitačně vytvrditelné - martenzitické a austenitické

Největší vliv na vlastnosti slitin železa má vždy uhlík (výrazně ovlivňuje právě svařitelnost). Výraznou mírou se však na vlastnostech ocelí podílejí i další prvky. Některé prvky jsou v různém množství přítomné v každé oceli, neboť jejich obsah souvisí se způsobem výroby ocelí a použitými surovinami. Jsou to tzv. doprovodné prvky a podle jejich účinků je řadíme mezi prospěšné nebo škodlivé. Vlastnosti ocelí lze ovlivňovat záměrnou přísadou některého prvku. Tyto prvky nazýváme přísadovými prvky, [6]:

Doprovodné - škodlivé S, P, O, N, H

- prospěšné Mn, Si, Al, Cu



Důvodem odolnosti nerezové oceli proti korozi je, že na povrchu slitin obsahujících chrom se vytváří tenká vrstva nerozpustných oxidů. Velký význam má stav povrchu materiálu, absence vnitřního pnutí a krystalických vad, [7].

2.2.1. Martenzitické korozivzdorné oceli

Jsou to oceli s obsahem chrómu do 18 % a uhlíku do 1,5 %, které po zakalení vykazují martenzitickou strukturu. Společné všem typům martenzitických ocelí je nebezpečí křehnutí. Křehnutí může vznikat po ohřevu na teplotu 350 - 550 °C, a proto je dobré se tomuto teplotnímu rozmezí při tepelném zpracování vyhnout.

Martenzitické oceli bez Ni obsahují 0,15 až 0,45% C a 13% Cr. Hlavní použití martenzitických ocelí je v přírodních podmínkách, jako je atmosféra, voda, pára, kde dochází k pasivaci povrchu do teplot 450 °C. Typy s obsahem uhlíku 0,2 % se používají pro lopatky parních turbín, součásti čerpadel a armatury v chemickém a energetickém průmyslu. Oceli s vyšším obsahem uhlíku 0,3 - 0,4 % se používají pro součásti kde je potřeba ořezavost, na nože a chirurgické nástroje. Zvýšení obsahu Cr na 15 % a uhlíku na 0,5 - 0,6 % a legování Mo, W a V zlepšuje odolnost proti rovnoměrné a důlkové korozi. Tyto oceli se používají na výrobu nožů v potravinářském průmyslu a v chirurgii a na ořezavé součásti pracující agresivních prostředích. Zvýšením Cr na 17 % a uhlíku na cca 1 % se dosáhne zlepšení korozní odolnosti a ocel je určena pro výrobu konstrukčních dílů pro chemický průmysl s vysokými nároky na ořezavost při vysoké korozní odolnosti. Nevýhodou při použití těchto ocelí s obsahem uhlíku nad 0,2 % je, že **nejsou svařitelné**.

Martenzitické chromové oceli s niklem mají cca 17 % Cr, 2 % Ni a 0,2 % C. Oceli se používají na lopatky parních turbín a další součásti přicházející do styku s vodou, párou a také s mořskou vodou. Oproti martenzitickým ocelím bez Ni má tento typ ocelí vyšší pevnost, zlepšené plastické vlastnosti a **podmíněnou svařitelnost**.

Supermartenzitické oceli představují nový vývojový trend v oblasti martenzitických korozivzdorných ocelí. Oceli mají novou konfiguraci prvků, především nízký obsah C pod 0,015 %, a dále 11 - 13 % Cr, 5,5 - 6,5 % Ni, 2 - 2,25 % Mo a velmi nízký obsah síry. Tyto oceli mají vysokou pevnost, zlepšenou houževnatost a jsou **dobře svařitelné**, [10].



2.2.2. Feritické korozivzdorné oceli

Feritické oceli obsahují 13 - 30 % Cr a obsah uhlíku je většinou pod 0,1 %. Nejsou kalitelné a jejich pevnost je vyšší než u nelegované uhlíkaté oceli. Velkou výhodou těchto ocelí je odolnost proti koroznímu praskání. Nevýhodou je náchylnost ke křehnutí za vysokých teplot nad 900 °C, křehnutí vlivem tvorby fáze a křehnutí při 475 °C, které značně ovlivňují mechanické vlastnosti.

Svařují se především tenkostěnné polotovary do tloušťky stěny 3 mm. Doporučené technologie svařování jsou: 111, 131, 141, 135 a 15. Svarový kov je méně odolný proti koroznímu praskání. Pro svařování technologiemi MIG a WIG se používají přídavné materiály s chemickým složením odpovídajícím základnímu materiálu nebo austenitické přídavné materiály. Jako ochranné plyny mají být použity argon, nebo směsi na bázi argonu, například M13 podle ČSN EN 439 a směsi neobsahující CO₂, vodík a dusík.

13% chromové feritické oceli jsou legovány 11,5 - 13,5 % Cr a obsah uhlíku je pod 0,08 %. Oceli mají dobrou korozní odolnost v atmosféře, v přírodní vodě a vodní páře. Používají se na zařízení v chemickém průmyslu, potrubí čerpadel, výměňkové trubky v zařízeních na zpracování ropy. Nejvyšší korozní odolnost je dosahována při kvalitním povrchu. Tvařitelnost a **svařitelnost je podmíněná**.

17% chromové feritické oceli obsahují Cr v rozmezí 16 - 18 %. Obsah uhlíku je pod 0,08 % a mohou být legované Mo a stabilizované Ti. Někdy může dojít za vyšších obsahů uhlíku, po ohřevu na teplotu nad 900 °C k austenitické přeměně a struktura po tepelném zpracování je smíšená - tyto oceli pak označujeme jako poloferitické. 17% chromové feritické oceli jsou korozně odolné proti atmosférické korozi, mořské vodě, kyselině dusičné, zředěným organickým kyselinám a roztokům solí. Vyznačují se dobrou odolností proti bodové korozi a koroznímu praskání v neutrálních nebo jen mírně kyselých roztocích za přítomnosti chloridových iontů. Stabilizace Ti zlepšuje odolnost proti mezikrystalové korozi. Stejně jako u 13% Cr feritických ocelí se nedoporučuje použití nad 320 °C. Používají se v potravinářském průmyslu pro zpracování mléka, výrobě piva, octa apod. Další použití nacházejí v automobilovém průmyslu, při výrobě kuchyňských potřeb a sanitárních zařízení, ve vzduchotechnice a v architektuře.

Nejvyšší obsah Cr mají 25% chromové oceli s různým obsahem uhlíku. Vysoký obsah Cr zaručuje vyšší korozní odolnost ve srovnání s 13% a 17% chromovými oceli, ale zároveň je příčinou náchylnosti ke křehnutí v oblasti výše uvedených kritických teplot. Hlavní význam však mají tyto 25% chromové oceli s obsahem uhlíku 0,1 - 0,2 % jako žáruvzdorné pro použití za vysokých teplot.



Nový metalurgický vývoj umožnil vyrobit ocel s čistě feritickou strukturou s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků (C + N). Tyto oceli se nazývají superferity a obsahují jako základní legující prvek 18 - 29 % Cr. Součet obsahu C + N se pohybuje mezi 0,015 až 0,025 % a obvykle jsou ještě stabilizovány Ti nebo Nb. Oceli jsou strukturně jednoduché, mají **dobrou svařitelnost**, tvařitelnost, vyšší pevnostní hodnoty, dobrou tažnost a vrubovou houževnatost. Velmi důležitá je zlepšená odolnost proti rovnoměrné a mezikrystalové korozi, vysoká odolnost proti koroznímu praskání za napětí, bodové a štěrbinové korozi, [10].

2.2.3. Austenitické Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) oceli

Austenitické oceli mají asi o 50% větší tepelnou roztažnost a asi o 30% nižší tepelnou vodivost než oceli feritické. Při svařování se to projevuje vznikem větších deformací a napětí v porovnání s feritickými ocelmi. Ve srovnání s austenitickou strukturou mají lepší tažnost a houževnatost než uhlíkové a nízkolegované oceli. Obsahují minimálně 16,5 hm.% Cr s dostatečným množstvím Ni a nebo Mn, C a N pro vytvoření austenitické mikrostruktury. Mohou být dále dolegovány Mo, Ti, Nb, Cu, Si pro zlepšení korozní odolnosti proti oxidaci. Svařují se obvykle ve stavu po rozpouštěcím žíhání. Svařitelnost austenitických Cr-Ni korozivzdorných ocelí ovlivňují tři hlavní faktory – Náchylnost k tvorbě teplých trhlin, precipitace karbidů chromu, zkřehnutí vznikem σ -fáze, [7].

2.2.4. Austeniticko – feritické oceli

Do této skupiny patří duplexní oceli s mikrostrukturou po rozpouštěcím žíhání 1020 až 1100°C/voda, 45 až 60% austenitu ve feritické matici. Obsahují 21 až 28% Cr, 3,5 až 8% Ni, 0,1 až 4,5% Mo a 0,05 až 0,35% N. Mohou být dále legované Cu a W. Mají vyšší mez pevnosti než čistě feritické nebo austenitické oceli. S ohledem na možné skřehnutí se používají do teploty 300°C. Protože duplexní oceli tuhnou jako feritické, nejsou prakticky náchylné na vznik teplých trhlin. Mají velmi dobrou odolnost proti koroznímu praskání a důlkové korozi, kterou si zachovávají i svarové spoje, [7].

2.3 Metody sledování struktur ocelí

2.3.1 Světelná mikroskopie

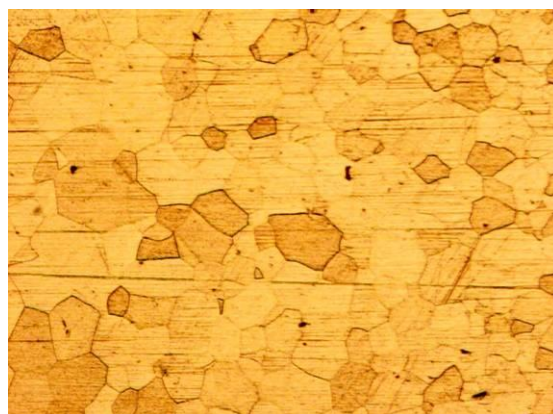
Přestože je světelná mikroskopie nejstarší metodou pozorování struktury kovů, je dodnes velmi používaná a má vysokou vypovídající schopnost.



Metalografické pozorování struktur kovů světelnou mikroskopií lze dělit podle hodnoty použitého zvětšení, na makroskopické a mikroskopické. Makroskopické pozorování se uskutečňuje při pozorování přibližně do 20x zvětšení a poskytuje přehledný obraz struktury, viz obr. 2.5. Mez mezi makroskopickým a mikroskopickým zvětšením není přesně dána. Za to mikroskopická pozorování poskytují informace o strukturních detailech. Pro pozorování struktur světelnou mikroskopií se využívají mikroskopů pracujících na principu odraženého světelného paprsku, viz obr. 2.6.



Obr. 2.5 Makrostruktura, zvětšeno 10x



Obr. 2.6 Mikrostruktura oceli, zvětšeno 150x

2.3.2 Faktory charakterizující metodiku světelné mikroskopie

Mezi faktory charakterizující světelnou mikroskopii se řadí *rozlišovací schopnost* – charakterizuje užitečné zvětšení mikroskopu. Je to nejmenší vzdálenost dvou bodů na pozorovaném objektu, které jsou od sebe ještě zřetelně rozlišitelné. Pro zvýšení rozlišovací schopnosti se dále využívají elektronové mikroskopy. Dále *hloubka ostrosti* – Je to vzdálenost mezi mezními rovinami, ve které je pozorovaný povrch ostře viditelný.

2.3.3 Optické metody zviditelnění struktury

Pokud chceme dosáhnout kvalitního obrazu struktury, je nutnost dosáhnout dostatečného kontrastu a optimálního množství odraženého světla. Důležitou částí je proto příprava vzorku, zejména způsob vyvolání struktury. K dosažení kontrastu nám také mohou pomoci vhodné optické metody, jako jsou: světlé a tmavé pole, polarizované světlo, fázový kontrast, interferenční kontrast.

Záleží hlavně na použití metalografického mikroskopu a jejich příslušenství, zda lze tyto metody použít.



2.3.4 Příprava vzorků pro metalografické pozorování

Odběr vzorku a označování

Způsob jakým odebereme vzorek a místo je třeba pečlivě zvážit, jelikož na nichž záleží objektivita posuzování struktury výrobku. Obecně platí, že vzorek během odběru nesmí být zahřán na více než je teplota fázových přeměn. Velikost vzorku se odvíjí od způsobu přípravy výbrusu a možnostech mikroskopu.

V případě svarů provádíme makroskopické řezy svarovým spojem i s oblastí tepelně ovlivněnou. U součástí poškozených během výroby nebo provozu lze posuzovat místo vzniku i rozvoj trhlin v jejím okolí. V tomto případě je nutno volit metodu, která zachová indicie porušení materiálu. U měkkých, snadno obrobitelných materiálů lze pro odběr použít řezání nebo frézování. Tvrdých a těžko obrobitelné materiály je možno odlomit, odříznout rozbrušováním.

Řezání nejednoduše se provádí laboratorními kotoučovými pilami s chladicí kapalinou. Používají se rozbrušovací kotouče kde řezným prvkem je Al_2O_3 uložený v bakelitu (slitiny železa), SiC uložený v bakelitu (neželezné kovy), diamant uložený v bakelitu (tvrdé a tvárné materiály) a diamant uložený v kovové vrstvě (tvrdé křehké kovy a minerály).

Označování vzorků není dobré podceňovat. Je vhodné provést označení písmeny nebo číselným kódem. Označení by později mělo jasně identifikovat vzorek a také jasně vyjadřovat konkrétní výrobek ze kterého byl odebrán. Označení lze provést razídky, elektrickou jiskrou, vzduchovým popisovačem, nebo zalitím značky do zalévací hmoty.



Obr. 2.7 Řezání nejednoduše rozbrušovací pilou [17]



Obr. 2.8 Rozbrušovací kotouče [17]



Preparování vzorků pro pozorování

Vzorky by měly mít takovou velikost a tvar, aby se dobře držely v ruce při broušení a leštění. Máme-li vzorek menších rozměrů, nebo k tomu vedou jiné důvody, lze vzorek zalít jednou z metod za studena nebo za tepla a připravit tak místo pro jeho uchopení. Pro zalití za studena se používá metylmetakrylová pryskyřice dodávaná ve formě prášku a tvrdidlo, nebo epoxidové pryskyřice. Po smíchání vznikne hustá kapalina, kterou se vzorek zalije. Poté vzorek tuhne. Tam kde nehrozí ovlivnění struktury zvýšeným tlakem a teplotou se používají lisy. Zde se používají různé typy umělých pryskyřic. Doba tuhnutí je oproti zalévání za studena podstatně kratší. Na obr. 2.9 je uveden přístroj pro zalévání vzorků a na obr. 2.10 je ukázka vzorků po zalití, tak jak se používají k dalším operacím.



Obr. 2.9 Přístroj pro zalévání za tepla [17]



Obr. 2.10 Vzorky zalité za tepla [17]

Broušení a leštění

Správně vybroušený vzorek by měl být zbaven nerovností, být rovnoměrně drsný a nemělo by dojít ke změně struktury. Proces broušení se začíná hrubým broušením až se postupně přechází na jemné broušení. Jako Brusivo se používá karbid křemíku, bóru a přírodní korund. Brusivo může mít různé podoby (brusné papíry, pasty, suspenze). K broušení se používají metalografické brusky, viz obr. 2.11.

Leštěním dosáhneme zrcadlového povrchu připravovaného vzorku, odstraní se rýhy jemného broušení. Leštění lze provést buď mechanicky, elektrolyticky, nebo chemicky. Rozdíl mezi broušením a leštěním je v tom, že při leštění se již neodebírá žádný materiál, dochází pouze ke srovnání povrchu. K leštění se používají nejčastěji kotouče potažené tkaninou na které se nanáší leštící prostředky.





Obr. 2.11 Metalografická bruska/leštička [17]

Zvýraznění struktury vzorku

Zvýraznění struktury (vyvolání struktury) vzorku je nejdůležitější operací při přípravě metalografického vzorku. Vyvolání struktury můžeme provést chemickým, elektrochemickým, nebo tepelným leptáním. Leptadlo volíme dle zkušeností, nebo podle různých doporučení z literatury a návodů.

Při použití chemického leptání na vyleštěný povrch vzorku dochází ke vzniku povrchového reliéfu nebo ke vzniku reakčních zplodin s jednotlivými strukturními složkami.

Elektrolytické leptání spočívá ve stejném principu, jako elektrolytické leštění. Vzorek, který je elektrolyticky vyleštěn se ponechá působení elektrického proudu a tím je naleptáván.

Princip tepelného leptání využívá selektivního odpařování částic kovu z různých míst vzorku při ohřevu ve vakuu. Tím se vytvoří potřebný reliéf, [3]. Na obr. 2.12 je uveden přístroj pro elektrolytické leptání a leptadlo německé provenience.



Obr. 2.12 Přístroj pro elektrolytické leptání a látka pro chemické leptání vzorků [17]



2.4 Mechanismy porušování kovů

2.4.2 Tvárné porušení

Tvárná trhlina vzniká u materiálů, které jsou schopné snášet velké plastické deformace tedy u houževnatých materiálů např. měď nebo nízkouhlíková ocel za normální teploty. Při dostatečném zatížení dochází k růstu trhliny a k lomu. Lomová plocha bude velice hrubá, bude totiž docházet k plastické deformaci – velké tvarové změně v okolí lomu.

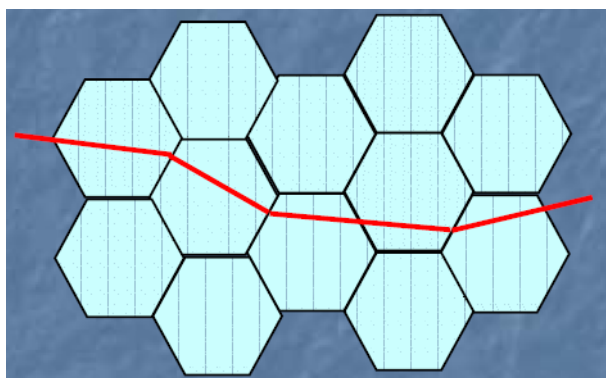
I velice čisté kovy obsahují drobné nekovové částice, které vznikly již při výrobě. Uvnitř těchto částic dochází k plastické deformaci a protože nekovové částice se nedeformují, vznikají kolem nich drobné dutinky. Při stálém působení napětí na díl dojde k protahování těchto dutinek a následném spojování (tvárný lom).

Tvárné porušení lze dále dělit na transkrystalické tvárné lomy a interkrystalické tvárné lomy. Nákres transkrystalického lomu je na obr. 2.13, reálný příklad transkrystalického tvárného lomu v příloze na obr. P4, [20].

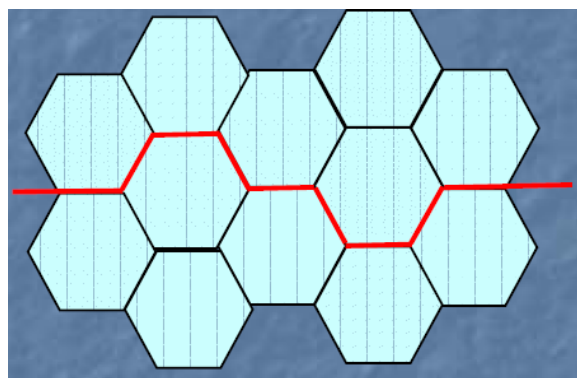
2.4.3 Štěpné porušení

Vezmeme-li v úvahu materiály jako je keramika, sklo, je na první pohled zřejmé, že lom se velmi liší od lomu tvárného. U těchto materiálů vzniká beztvářý lom bez známek plastické deformace. Trhlina se šíří mezi dvěma atomovými rovinami a tím vzniká plochá rovina štěpným mechanismem. Energie pro porušování vazeb je mnohonásobně menší než energie absorbovaná při tvárném lomu houževnatých materiálů. To je hlavní příčina křehkosti keramiky a skla, [3].

Štěpné porušení lze dále dělit podobně jako u tvárného porušení na transkrystalické štěpné lomy a interkrystalické štěpné lomy. Nákres interkrystalického lomu je na obr. 2.14, reálný příklad transkrystalického štěpného lomu v příloze na obr. P5 a interkrystalického štěpného na obr. P6, [20].



Obr. 2.13 Transkrystalický lom [20]



Obr. 2.14 Interkrystalický lom [20]

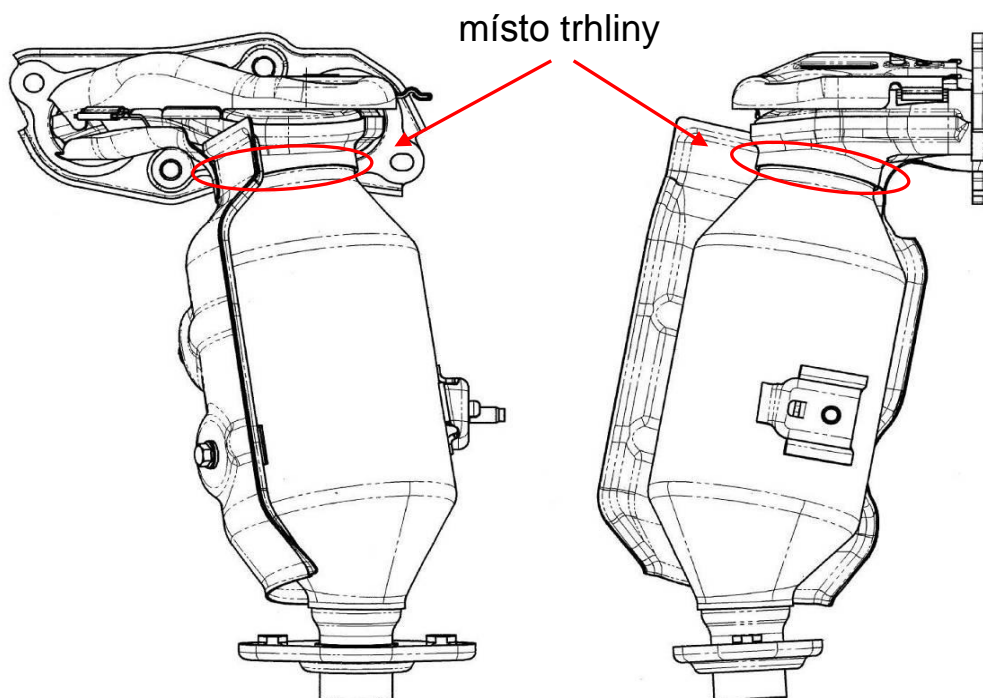


3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

3.1 Úvod a cíl experimentální části

Experimentální část práce je zaměřena na analýzu a zjištění příčiny porušení svarku, resp. prvnímu dílu výfukové soustavy automobilu, který se nazývá svodové potrubí. Tento díl se nachází přímo na bloku motoru a za úkol má odvést výfukové spaliny z jednotlivých válců motoru do jednoho centrálního potrubí. Součástí tohoto dílu je i katalyzátor, který má za úkol snižovat obsah nebezpečných látek jdoucích ve formě spalin z motoru. Dále na tento díl navazuje středový díl výfukové soustavy, který může být vybaven rezonátorem. Na středový díl navazuje zadní díl, který je bývá vždy vybaven tlumičem.

Jak jsem již zmínil, sledovaný díl přímo doléhá na blok spalovacího motoru, proto na něho působí vysoké teploty. Díl je opatřen kryty, které snižují jeho tepelné namáhání a současně chrání i okolní součásti v motorovém prostoru od vysokých teplot. Díl je připevněn čtyřmi šrouby k bloku motoru, jedním šroubem k držáku a dvěma šrouby k druhému dílu výfukového systému za přírubu. Schéma sledovaného dílu je na obr. 3.1.

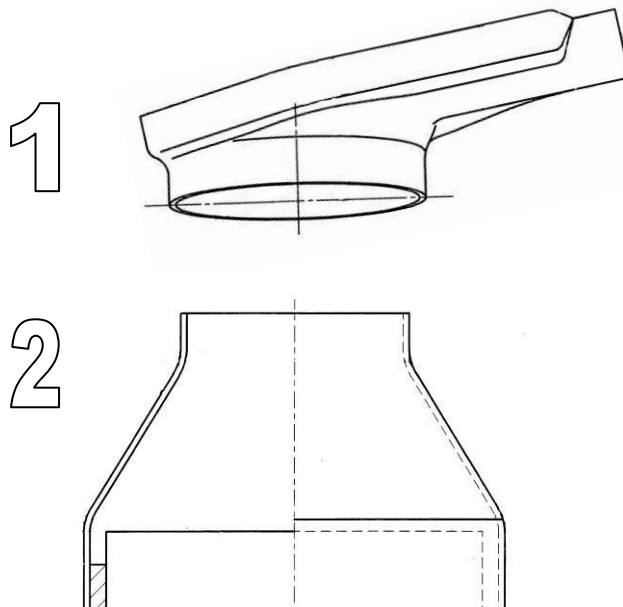


Obr. 3.1 Schéma analyzovaného dílu [15]



Samotný díl je svařen z mnoha komponentů v jeden celek, nicméně nás bude zajímat pouze označené místo na obr. 3.1. V tomto místě se schází díl č. 1, viz obr. 3.2, který je vyroben tvářením za studena z 1,5mm tlustého nerezového plechu 1.4509 a díl č. 2 (obr. 3.2), který je vyroben ze stejného materiálu a stejnou technologií.

Tyto dva materiály jsou spojeny technologií svařování 135 což je metoda MAG (Metal-Active-Gas). Jako přídatný materiál byl použit drát průměru 1mm a materiálu 1.4511, který byl odvinut z cívky barelu. Ochrannou atmosféru tvořil aktivní plyn (Argon 97,5% + CO₂ 2,5%).



Obr. 3.2 Komponenty č.1 a 2 [15]

Cílem prováděného experimentu je provedení rozboru vedoucího k posouzení příčiny porušení svařovaného dílu – trhliny. Trhlina, která vznikla po obvodu dílu těsně podél svarové housenky, viz obr. 3.3, byla předmětem mého zkoumání a analýz. Trhlina nevznikla během výroby, tj. v procesu svařování, nýbrž po určité době funkčního období, což dokazuje odlišné zbarvení (zlatavé zabarvení) celého dílu.



Obr. 3.3 Obvodová trhlina těsně podél svarové housenky

V rámci zjišťování příčiny porušení dílu byly provedeny tyto základní analýzy:

- 1) Ověření materiálů pomocí spektrální analýzy
- 2) Ověření kvality svarové housenky pomocí makroskopického pozorování vzorků dílu
- 3) Zkoumání mikrostruktury materiálu v tepelně ovlivněné oblasti poblíž trhliny světelným mikroskopem
- 4) Analýza lomové plochy pomocí světelného mikroskopu

Experiment probíhal v materiálové laboratoři společnosti Faurecia Bakov nad Jizerou, kde jsem měl možnost provést ověření chemického složení materiálu na mobilním spektrometru SPECTROTEST, ověření kvality svarové housenky mikroskopem LEICA Z16 APO, zkoumání struktury materiálu v tepelně ovlivněné oblasti poblíž trhliny pomocí optického mikroskopu a zkoumání lomové plochy optickým mikroskopem.

3.2 Materiálová analýza

Cílem materiálové analýzy bylo ověřit chemické složení obou svařovaných komponentů, zda tyto komponenty jsou vyrobené z materiálů, které odpovídají výkresové dokumentaci a zda jsou tyto materiály vhodné k danému použití.

3.2.1 Použitý přístroj

Materiálovou analýzu jsem provedl mobilním spektrometrem SPECTROTEST od firmy AMETEK, obr. 3.4. Mobilní spektrometr SPECTROTEST_{CCD} umožňuje přesnou chemickou analýzu oceli a litiny. Klíčovým prvkem a srdcem celého přístroje je optický systém, který poskytuje plné pokrytí nezbytných vlnových délek. Spektrometr je vybaven počítačem se softwarem Spark analyzer ME SPECTROTEST CCD Ver.: 2.0.6. Tento systém umožňuje bezproblémovou komunikaci mezi obsluhou přístrojem. Chloubou tohoto přístroje je takzvaná inteligentní kalibrační logika (ICAL), která sleduje správný stav měřicího systému nezávisle na externích ovlivněních. Při ICAL rekaliibraci je nutno změřit jenom jeden kontrolní vzorek.





Obr. 3.4 Mobilní spektrometr SPECTROTEST [16]

Spektrometr „Spectrotest“ disponuje dvěma metodami měření:

- 1) Obloukové měření – zde se nevyužívá ochranné atmosféry, stříbrná elektroda (hrot) má průměr 6mm a měření probíhá přibližně 3sekundy. Tato metoda je vhodná pro nízkoalokované ocele. Je to metoda méně přesná než jiskrová, ale za to rychlejší.
- 2) Jiskrové měření v ochranné atmosféře – jako ochranná atmosféra je použit netečný plyn argon, wolframová elektroda (hrot) má průměr 4mm a měření probíhá přibližně 10 sekund. Metoda je přesnější než oblouková, navíc lze měřit i obsah uhlíku.

Změnou měřicí standardní sondy, viz obr. 3.5, za UV sondu, obr 3.6, lze měřit i obsah nekovových prvků jako jsou N, P, S. Nicméně náš přístroj tuto měřicí UV sondu nemá, proto jsem měl možnost měřit pouze obsah kovových prvků v materiálu.



Obr. 3.5 Standardní sonda [16]



Obr. 3.6 UV sonda [16]



Optika

- 1) CCD detektory s vysokým rozlišením
- 2) Rollandova kružnice 400mm
- 3) Efektivní vlnová délka 185 – 670 nm
- 4) Automatické profilování

Obloukové buzení

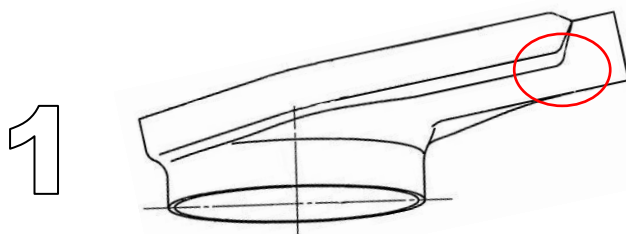
- 5) Přímý proudový oblouk, max. 2.8 A
- 6) 12 KW zapálení přímého proudového oblouku individuálními výboji
- 7) Napětí oblouku 20-40 V

Jiskrové buzení

- 8) Digitální plazmový generátor s digitální definicí výboje, digitální generování pulsů
- 9) HEPS (vysokoenergetické předjiskření)

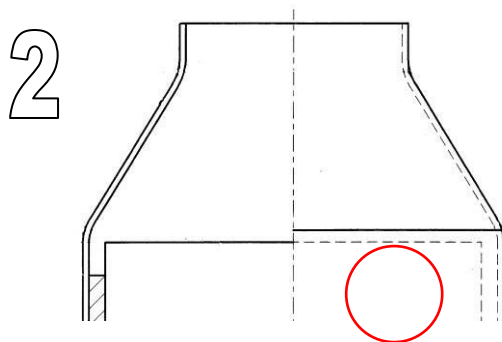
3.2.2 Odebrání vzorků

Jako první proběhlo odebrání vzorku pro materiálovou analýzu z obou komponentů. Prvního komponentu z oblasti vyznačené na obr. 3.7 a druhého komponentu z oblasti vyznačené na obr. 3.8. Vzorky jsem vytvořil vyříznutím materiálu přibližně o rozměrech 30x30mm úhlovou bruskou, poté lisováním vyříznutého materiálu do roviny ručním lisem z důvodu zvlnění. Ještě před měřením jsem dodatečně očistil povrch brusnou vatou od nečistot. Tímto byly reprezentativní vzorky obou komponentů připraveny k použití.



Obr. 3.7 První komponent s vyznačenou oblastí odebraného vzorku [15]





Obr. 3.8 Druhý komponent s vyznačenou oblastí odebraného vzorku [15]

3.2.3 Sledování chemického složení materiálu

Před samotným měřením byl překontrolován redukční ventil na lahvi s argonem, poté bylo načteno chemické složení předpokládaného materiálu ze systémové databáze, která obsahuje velké množství různých kvalit kovových materiálů. Z technického výkresu dílu bylo zjištěno, že předpokládaný materiál je ocel, které odpovídá značení 1.4509 dle evropské normy EN 10088-2-2005, s intervalem chemického složení prvků a vlastností, viz tab. 3-1.

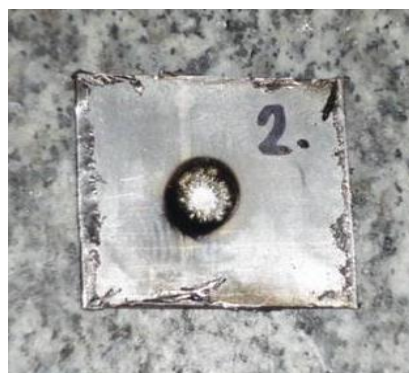
Chemické složení jsou vlastně intervaly chemických prvků v procentech, v kterých by se měla pohybovat naměřená hodnota.

Samotné měření se provedlo přiložením vzorku na sondu a vhodně zatížilo těžítkem. V první fázi probíhalo před jiskření, které vypálilo do vzorku maličký důlek, který je předpokladem dosažení přesnějšího měření. V druhé fázi probíhá měření v předjiskřené oblasti.

Celý proces obou fází trval pouze několik málo sekund a bezprostředně po měření jsem měl zobrazen výsledek na obrazovce. Měření na jednom vzorku jsem provedl 10x, viz tab. 3-2 a tab. 3-4, poté z těchto deseti měření vytvořil průměrné hodnoty jednotlivých prvků, tab. 3-3 a tab. 3-5. Stopu, které zanechala sonda na vzorcích po měření je patrná z obr. 3.9 a obr. 3.10.



Obr. 3.9 Stopa po měření na vzorku číslo 1



Obr. 3.10 Stopa po měření na vzorku číslo 2



Tabulka 3-1 Chemické složení oceli EN 10088-2-2005 1.4509 (X2CrTiNb18), Cr-Ti-Nb feritická korozi-vzdorná ocel [8]

W Nr. (číslo materiálu) 1.4509				Cr-Ti-Nb feritická korozivzdorná ocel				OCEL Kurzname (značka) X2CrTiNb18			
Chemické složení [hm. %]											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti				
max 0,03	max 1,00	max 1,00	max 0,040	max 0,015	17,5–18,5	3xC+ (0,30–1,00)	0,10–0,60				
Normy DIN											
DIN EN 10088/1,2–97 – korozivzdorná ocel											
Mechanické vlastnosti											
Rozměr t, d [mm]				≤ 6							
Stav žíhání				pás válcovaný za studena							
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa]		podél min		230							
		napříč min		250							
Mez pevnosti R _m [MPa]				430–630							
Tažnost A ₈₀ nebo A [%] min				18							
Kontrakce Z [%]				–							
Nárazová práce [J]				–							
Tvrdost HB				–							
Modul pružnosti E [GPa]				220							
Hodnoty modulu pružnosti E [GPa] při zvýšených teplotách											
Teplota [°C]				100	200	300	400				
Modul pružnosti E [GPa]				215	210	205	195				
Min hodnoty meze kluzu R _p 0,2 [MPa] při zvýšených teplotách (stav žíhání)											
Teplota [°C]				100	150	200	250	300	350		
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa]				230	220	210	205	200	180		
Fyzikální vlastnosti											
Hustota ρ [kg . m ⁻³]		Měrné teplo C _p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]		Teplotní součinitel roztlačnosti α [K ⁻¹]		Tepelná vodivost λ _t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]		Rezistivita [Ω . mm ² mm ⁻¹]			
7 700		460		10,0 . 10 ⁻⁶		25		0,60			
Odolnost proti degradačním procesům											
ODOLNOST PROTI KOROZI											
odolná mezikrystalové korozi v dodaném stavu i po svařování											
Technologické údaje											
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ											
žíhání				870–930 °C		ochlazovat na vzduchu nebo ve vodě					
TVAŘITELNOST											
teploty tváření				1100–800 °C		ochlazovat na vzduchu					



Tabulka 3-2 Přehled výsledků deseti měření vzorku číslo 1

vzorek číslo: 1 jakost: 1.4509 \ EN 10088-2										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1	<0.010	0.468	0.268	18.03	0.054	0.239	0.009	<0.009	0.128	0.447
2	<0.010	0.465	0.268	18.00	0.051	0.240	0.009	<0.009	0.129	0.452
3	<0.010	0.470	0.269	18.11	0.052	0.243	0.008	<0.009	0.133	0.452
4	<0.010	0.463	0.271	18.20	0.051	0.241	0.008	<0.009	0.134	0.461
5	<0.010	0.499	0.288	18.00	0.056	0.266	0.009	<0.009	0.154	0.53
6	<0.010	0.454	0.275	18.03	0.053	0.297	0.008	<0.009	0.150	0.497
7	<0.010	0.426	0.262	18.25	0.052	0.274	0.007	0.015	0.127	0.458
8	<0.010	0.411	0.261	18.25	0.057	0.257	0.008	<0.009	0.123	0.456
9	<0.010	0.431	0.259	18.13	0.056	0.235	0.009	<0.009	0.120	0.445
10	<0.010	0.390	0.254	18.29	0.059	0.309	0.008	0.021	0.120	0.441
	Ti	V	W	Pb	Zr	Fe				
1	0.160	0.069	<0.040	<0.010	0.006	80.1				
2	0.164	0.070	<0.040	<0.010	0.006	80.1				
3	0.165	0.071	<0.040	<0.010	0.007	80.0				
4	0.168	0.072	<0.040	<0.010	0.007	79.9				
5	0.209	0.089	0.041	<0.010	0.012	79.8				
6	0.184	0.085	<0.040	<0.010	0.011	79.9				
7	0.164	0.074	<0.040	<0.010	0.006	79.9				
8	0.165	0.073	<0.040	<0.010	0.007	79.9				
9	0.161	0.071	0.042	<0.010	0.006	80.0				
10	0.158	0.072	<0.040	<0.010	0.006	79.8				

Připraveno 03528 Fe-30

Optika: 30.3 °C Přístroj: 29.5 °C

F1 Návod F2 Proplach F3 Vzorek F4 Najít F5 Uložit F6 Tisk F7 Protokol F8 ICALizace F9 FP F10 APF+ F11 Nahrát F12 Výsledky

Tabulka 3-3 Přehled výsledků aritmetického průměru deseti měření vzorku číslo 1

vzorek číslo: 1 jakost: 1.4509 \ EN 10088-2										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
↓	0.000	0.000	0.000	17.50						
⌘	0.010	0.448	0.268	18.13	0.054	0.260	0.008	0.009	0.132	0.464
↑	0.030	1.00	1.00	18.50						
	Ti	V	W	Pb	Zr	Fe				
↓	0.100									
⌘	0.170	0.075	0.040	0.010	0.007	80.0				
↑	0.60									

Stlač <ESC> pro jednotlivé měření Připraveno 03528 Fe-30

Optika: 30.4 °C Přístroj: 29.6 °C

F1 Návod F2 Proplach F3 Vzorek F4 Najít F5 Uložit F6 Tisk F7 Protokol F8 ICALizace F9 FP F10 APF+ F11 Nahrát F12 Výsledky

Tabulka 3-4 Přehled výsledků deseti měření vzorku číslo 2

vzorek číslo: 2 jakost: 1.4509 \ EN 10088-2										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1	<0.010	0.435	0.241	18.23	0.056	0.219	0.009	<0.009	0.114	0.441
2	<0.010	0.442	0.249	18.35	0.056	0.227	0.009	<0.009	0.117	0.439
3	<0.010	0.430	0.249	18.07	0.057	0.226	0.009	<0.009	0.115	0.437
4	<0.010	0.432	0.250	18.17	0.056	0.223	0.009	<0.009	0.115	0.442
5	<0.010	0.402	0.251	18.13	0.056	0.220	0.009	<0.009	0.112	0.442
6	<0.010	0.433	0.257	18.11	0.054	0.235	0.009	<0.009	0.127	0.459
7	<0.010	0.438	0.257	18.08	0.051	0.236	0.008	0.025	0.128	0.467
8	<0.010	0.433	0.261	18.05	0.054	0.238	0.008	<0.009	0.129	0.469
9	<0.010	0.442	0.256	17.89	0.052	0.236	0.009	<0.009	0.127	0.473
10	<0.010	0.453	0.260	18.24	0.053	0.237	0.008	0.024	0.133	0.464
	Ti	V	W	Pb	Zr	Fe				
1	0.155	0.070	<0.040	<0.010	0.004	80.0				
2	0.157	0.070	<0.040	<0.010	0.004	79.8				
3	0.157	0.070	<0.040	<0.010	0.005	80.1				
4	0.158	0.070	<0.040	<0.010	0.005	80.0				
5	0.161	0.070	<0.040	<0.010	0.005	80.1				
6	0.164	0.075	<0.040	<0.010	0.006	80.0				
7	0.168	0.077	<0.040	<0.010	0.006	80.0				
8	0.168	0.078	<0.040	<0.010	0.007	80.1				
9	0.169	0.077	<0.040	<0.010	0.006	80.2				
10	0.167	0.076	<0.040	<0.010	0.006	79.8				

Měření provedeno: Připraveno 03538 Fe-30
 Optika: 30.7 °C Přístroj: 30.2 °C

F1 Návod F2 Proplach F3 Vzorek F4 Najít F5 Uložit F6 Tisk F7 Protokol F8 ICALizace F9 FP F10 APF+ F11 Nahrát F12 Výsledky

Tabulka 3-5 Přehled výsledků aritmetického průměru deseti měření vzorku číslo 2

vzorek číslo: 2 jakost: 1.4509 \ EN 10088-2										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
↓	0.000	0.000	0.000	17.50						
\bar{x}	0.010	0.434	0.253	18.13	0.055	0.230	0.009	0.009	0.122	0.453
↑	0.030	1.00	1.00	18.50						
	Ti	V	W	Pb	Zr	Fe				
↓	0.100									
\bar{x}	0.162	0.073	0.040	0.010	0.006	80.0				
↑	0.60									

Stlač <ESC> pro jednotlivé měření Připraveno 03538 Fe-30
 Optika: 30.8 °C Přístroj: 30.4 °C

F1 Návod F2 Proplach F3 Vzorek F4 Najít F5 Uložit F6 Tisk F7 Protokol F8 ICALizace F9 FP F10 APF+ F11 Nahrát F12 Výsledky

3.2.4 Vyhodnocení

V porovnání naměřených výsledků obou materiálů, viz tab.3-3 a tab.3-5 s tabulkou vlastností předepsaného materiálu, viz tab. 3-1 můžeme konstatovat, že chemické složení obou měřených materiálů odpovídá předepsanému složení. V předepsaném chemickém složení se dále objevuje prvek P fosfor a S síra. Tyto dva prvky nebylo možné měřit, jelikož nám použité zařízení toto neumožňovalo. V tabulce 3.1 navíc najdeme i další předepsané vlastnosti použitého materiálu.

3.3 Analýza svaru

Cílem analýzy svaru bylo ověřit kvalitu daného svarového spoje, zda splňuje požadavky dle příslušné specifikace uvedené ve výkrese dílu. Základem použité interní specifikace EED-S-PSE-0002 je norma ISO 5817 svarové spoje – určování stupňů jakosti.

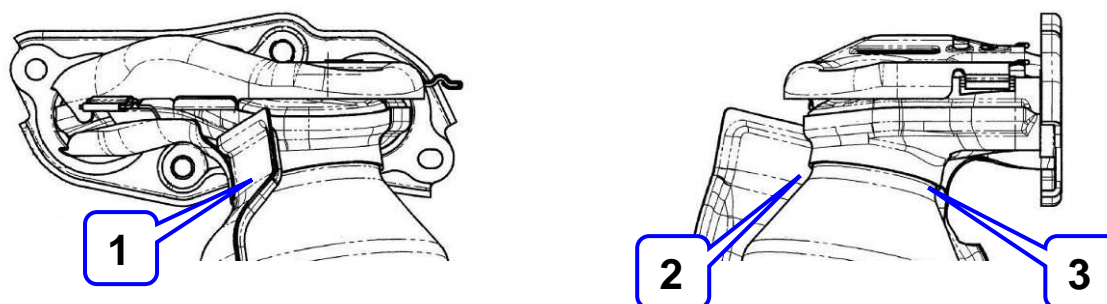
Přehled použitého zařízení

- Úhlová bruska BOSCH 115
- Laboratorní pila STRUERS Discotom-6, viz obr. 3.16
- Lis vzorků LECO PR-4X
- Leštička STRUERS LaboPol-5, viz obr. 3.17
- Leptadlo ADLER
- Optický mikroskop LEICA Z16 APO
- Software LEICA IM50 4.0

3.3.1 Postup přípravy vzorků

Ze všeho nejprve bylo potřeba vybrat místa pro odběr vzorků. Dle interní specifikace se u kruhových svarů odebírá jeden vzorek na 45° od počátku svarové housenky a druhý na 225°. Nicméně já volil místa tři rovnoměrně rozložené po obvodu, z důvodu přesnější analýzy kvality celé housenky. Označená místa analyzovaných míst nám je uvedeno na obr. 3.15.





Obr. 3.15 Analyzovaná místa [15]

Další kroky směřovaly do řezací místnosti, kde proběhlo vyříznutí vzorků úhlovou bruskou BOSCH 115 a následné označení vzorků. Přesné a hlavně minimálně tepelně i deformačně ovlivněné vzorky vznikly až po rozbroušení vzorků na laboratorní pile STRUERS Discotom-6, viz obr. 3.16. Touto technologií rozbroušování vzniká velmi jemný povrch řezu, který je výhodný pro následující operace.

Ještě před samotným broušením a leštěním vzorků, byly vzorky zality do termosetu technologii zalévání za tepla pomocí zařízení LECO PR-4X, které je součástí vybavení laboratoře společnosti Faurecia Bakov nad Jizerou.

Broušení a leštění bylo provedeno na zařízení STRUERS LaboPol-5 s použitím brusné hlavy na tři vzorky, která byla i součástí leštičky, viz obr. 3.17. K broušení byla použita brusná fólie (nejprve hrubší SiC Foil #220, poté SiC Foil #500 a nakonec SiC Foil #1000). Pak následovalo vložení vzorků, nastavení přitlaku a volba vhodných otáček (nejprve nižší – s vyšší jemností brusného papíru se otáčky zvyšují). Celý proces broušení probíhal s přiváděním vody na brusnou fólii. Vzorky byly kvalitně vyleštěny a pro makrostrukturní zkoumání vyhovovaly.



Obr. 3.16 STRUERS Discotom-6



Obr. 3.17 STRUERS LaboPol-5

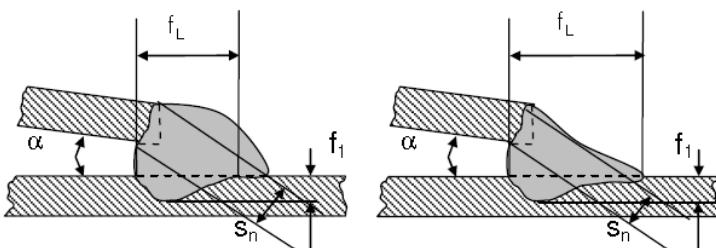
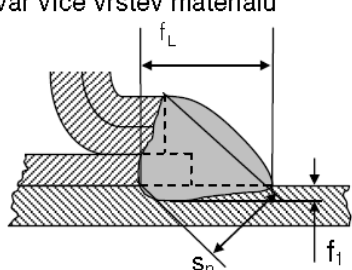


Pro zvýraznění struktury bylo použito chemické leptání vzorků leptadlem ADLER (kyselina chlorovodíková a chlorid železitý). Vyvolání struktury probíhalo v digestoři tomu určené, která byla dostatečně osvětlena a odsávána pro bezpečné použití. Leptání jsem provedl nanesením vrstvičky Adlera na vzorek – několik sekund ponechal, následně opláchl technickým lihem a osušil proudem stlačeného vzduchu. Toto jsem opakoval u zbytku a tímto byly vzorky připraveny na analýzu.

3.3.2 Vyhodnocení vzorků

Vyhodnocení struktury vzorků bylo provedeno pomocí mikroskopu LEICA Z16 APO, který je vybaven kamerou pro snímání obrazu a optikou s desetinásobným zvětšením. Zjištěné struktury byly zdokumentovány vyfotografováním, viz tab. 3-7. K vyhodnocení byl využit software LEICA IM50 4.0, ve kterém bylo možno proměřit obrázky získaných svarů. Proměřil jsem pouze ty vzdálenosti na sledovaném vzorku, které jsou požadovány interní specifikací EED-S-PSE-0002 pro tento typ svaru. Výřez ze specifikace zaměřená na koutový svar přeplátovaný, viz tab. 3-6, ve které jsou i zároveň limitní hodnoty, kterých by měl svar dosahovat.

Tabulka 3-6 Kvalitativní požadavky koutového svaru přeplátovaného [18]

Geometrie svaru	Požadavky
<p>koutový svar přeplátový Platí pro $\alpha \leq 30^\circ$</p> <p>konkávní svar (převýšený) konvexní svar (proláklý)</p>  <p>svar více vrstev materiálu</p> 	<ul style="list-style-type: none"> hloubka závaru $f_1 \geq 0.2\text{mm}$ 100% natavení hrany délka závaru $f_L \geq t_{\min}$ výška svaru $s_n \geq 0.7 \times t_{\min}$ Nepřípustné vady viz Tab 4

V tabulce 3.2 potom můžeme pozorovat jednotlivé proměřené vzorky 10x zvětšené. Jsou zde uvedené tloušťky obou svařovaných materiálů (dle výkresové dokumentace), z nichž vychází limitní hodnoty pro délku závaru a výšku svaru. Žádná nepřipustná vada nebyla na vzorkách zjištěna. Jedna hraniční hodnota byla naměřena u vzorku č.2. Jde o mezeru mezi materiály 0,95mm (limitní hodnota je 1mm). U vzorku č.1 je hloubka závaru v celé tloušťce svařovaného materiálu (v tabulce označeno EP = excess penetration). Naměřená hodnota 0,17 mm je velikost průvaru (limitní hodnota je 1mm). U vzorku č.2 a 3 je k vidění trhlina z profilu, která je umístěna těsně podél svarové housenky.

Tabulka 3-7 Naměřené hodnoty a porovnání se standardem

1.

tloušťky	
t_1	1,50
t_2	1,50
t_{min}	1,50

standard	naměřeno	
$f_1 \geq 0,20$	EP	OK
f_2		
$f_{L1} \geq 1,50$	4,70	OK
f_{L2}		
$S_N \geq 1,05$	1,23	OK
natavení hran:	100%	OK
výsledek :	OK	

defekt :

OK

2.

tloušťky	
t_1	1,50
t_2	1,50
t_{min}	1,50

standard	naměřeno	
$f_1 \geq 0,20$	0,37	OK
f_2		
$f_{L1} \geq 1,50$	6,03	OK
f_{L2}		
$S_N \geq 1,05$	1,37	OK
natavení hran:	100%	OK
výsledek :	OK	

defekt :

OK

3.

tloušťky	
t_1	1,50
t_2	1,50
t_{min}	1,50

standard	naměřeno	
$f_1 \geq 0,20$	0,53	OK
f_2		
$f_{L1} \geq 1,50$	5,75	OK
f_{L2}		
$S_N \geq 1,05$	1,28	OK
natavení hran:	100%	OK
výsledek :	OK	

defekt :

OK

3.4 Analýza mikrostruktury

Cílem analýzy mikrostruktury bylo nahlédnout na strukturu v oblasti začínající trhliny a také v místě, kde materiál ještě nebyl porušen, proto pro dokumentaci byly zpracovány dva vzorky.

Přehled použitého zařízení

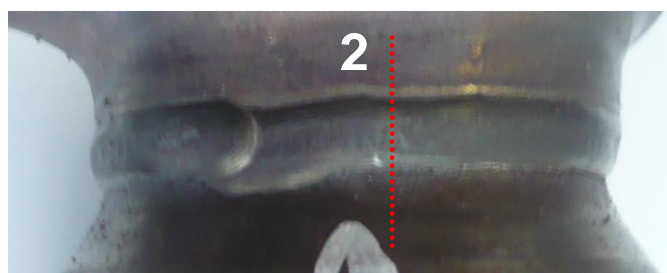
- Úhlová bruska BOSCH 115
- Laboratorní pila STRUERS Discotom-6, viz obr. 3.16
- Lis vzorků LECO PR-4X
- Leštička STRUERS LaboPol-5, viz obr. 3.17
- Leptadlo Acid solution FRY „B“
- Optický mikroskop LEICA Z16 APO
- Software LEICA IM50 4.0
- Externí osvětlení LEICA KL1500 LCD

3.4.1 Postup přípravy vzorků

Místa odběru vzorků jsem volil v místě začínající praskliny a v místě kam se prasklina nestačila rozšířit. Dokumentovaná místa nám zobrazuje obr. 3.18 a obr. 3.19.



Obr. 3.18 Označené místo odběru vzorku č.1 v místě začínající trhliny



Obr. 3.19 Označené místo odběru vzorku č.2 v místě bez trhliny



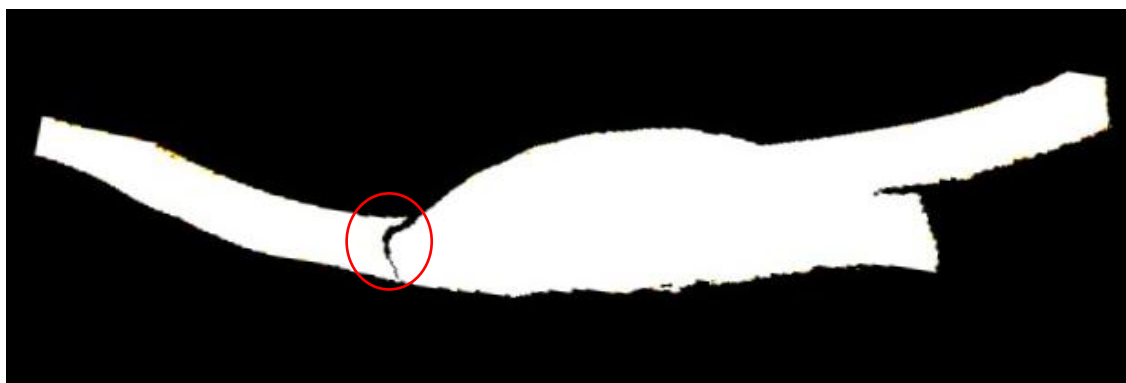
Příprava vzorků dále probíhala téměř stejně jako při analýze svaru, rozdíly nastaly při procesu broušení a leštění.

Po broušení nejmenno brusnou fólií SiC Foil #1000 následovalo leštění na plstěných kotoučích s přiváděním brusné suspenze. Nejprve hrubší 3 μ suspenzí, poté 1 μ suspenzí, která byla dávkována ručně a její množství nebylo nijak kontrolováno. Během celého procesu leštění bylo dbáno na čistotu prostředí a leštičky, aby na vzorcích nebyli viditelné rýhy po nečistotách. Vzorky byly kvalitně vyleštěny a pro mikrostrukturní zkoumání vyhovovaly.

Pro zvýraznění struktury bylo použito chemické leptání vzorků leptadlem vhodným ke zviditelnění struktury označované Acid solution FRY „B“ (kyselina chlorovodíková, chloridy kovů, ethanol). Vyvolání struktury probíhalo v digestoři tomu určené, která byla dostatečně osvětlena a odsávána pro bezpečné použití. Leptání jsem provedl nanesením vrstvičky leptadla na vzorek – několik sekund ponechal, následně opláchl technickým lihem a osušil proudem stlačeného vzduchu. Toto jsem opakoval u zbytku a tímto byly vzorky připraveny k vyhodnocení.

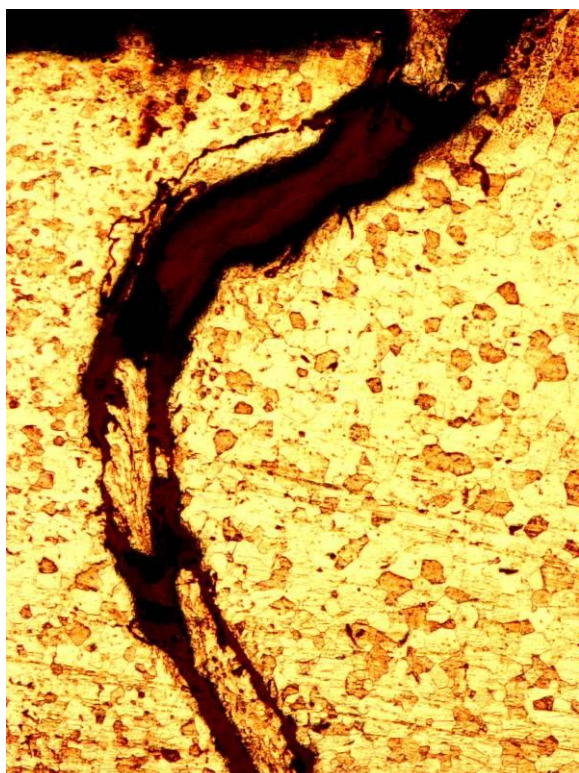
3.4.2 Vyhodnocení

Vyhodnocení struktury vzorků bylo provedeno pomocí mikroskopu LEICA Z16 APO, který je vybaven kamerou pro snímání obrazu a optikou s desetinásobným zvětšením. Tuto optiku bylo potřeba vyměnit za optiku se stonásobným zvětšením. Také bylo nutné použít externí osvětlení LEICA KL1500 LCD, protože bylo potřeba mnohem silnější osvětlení, než při zkoumání svarů 10x zvětšených. Po důkladném zaostření byly označená místa ze vzorku č.1, viz obr. 3.20 a vzorku č.2 viz obr. 3.21 zdokumentovány vyfotografováním. Pořízené snímky lze pozorovat na obr. 3.22, 3.23, 3.24, 3.25.



Obr. 3.20 Označená snímaná oblast na vzorku č.1 v místě se začínající trhlinou



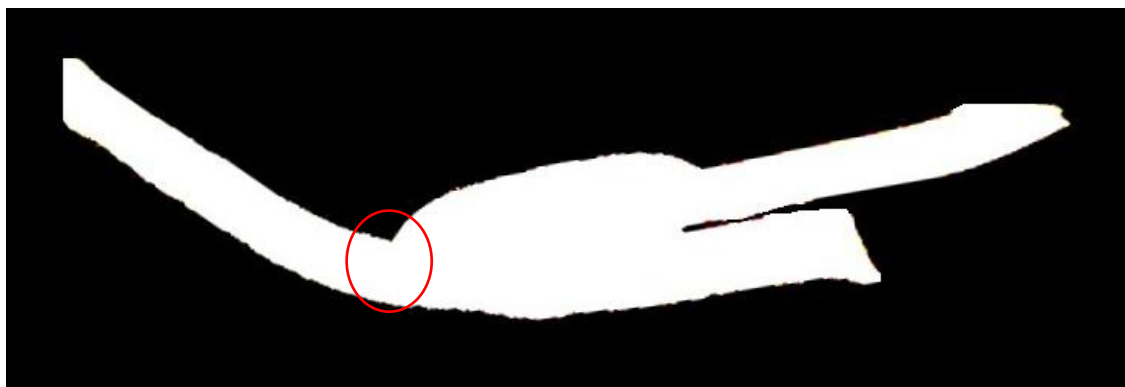


Obr. 3.22 Vrchní část trhliny 150x zvětšeno

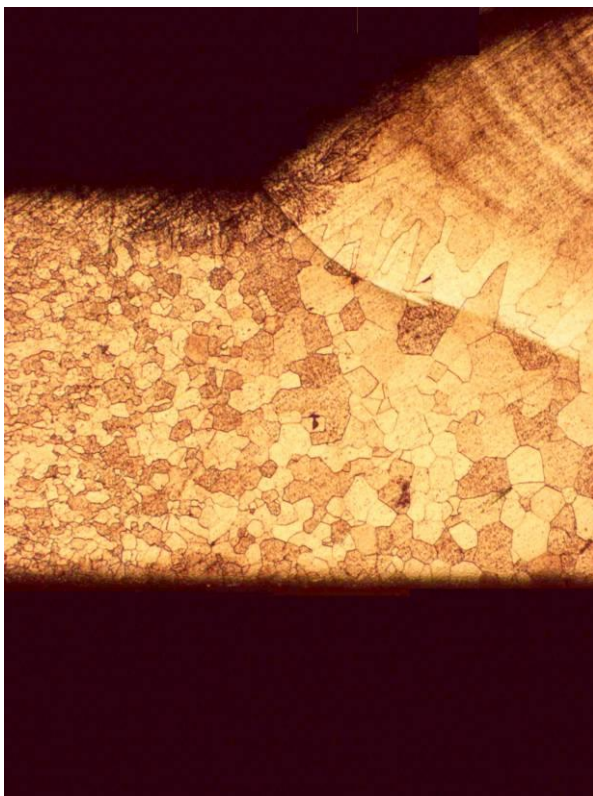


Obr. 3.23 Spodní část trhliny 150x zvětšeno

U vzorku č.1 je zachycena trhlina, která se z hlavní lomové plochy větvila, což dokazuje, že materiál v těchto místech byl přetížen. Vzorek č.2 nevykazuje žádnou vadu, která by měla vést k porušení materiálu. Dále můžeme pozorovat napojení svarového kovu k podkladovému materiálu, které nevykazuje také žádné vady.



Obr. 3.21 Označená snímaná oblast na vzorku č.2 v místě bez trhliny



Obr. 3.24 Místo bez trhliny 75x



Obr. 3.25 Detail hranice 150x

3.5 Analýza části lomové plochy

Cílem analýzy části lomové plochy bylo zjistit místo počátku resp. konce trhliny a způsob šíření lomu. Analýza vzorků byla provedena pomocí optického mikroskopu LEICA Z16 APO.

Přehled použitého zařízení

- Úhlová bruska BOSCH 115
- Ultrazvuková pračka KRAINTEK 2
- Optický mikroskop LEICA Z16 APO
- Software LEICA IM50 4.0
- Externí osvětlení LEICA KL1500 LCD

3.5.1 Postup přípravy vzorků

Ze zbytků svaru s trhlinou byly vytvořeny dva vzorky, viz obr 3.26, odříznutím úhlovou bruskou BOSCH 115 ze samotného dílu. Ještě před zkoumáním lomové plochy bylo potřeba zbavit vzorky nečistot. K tomu posloužila ultrazvuková pračka KRAINTEK 2.





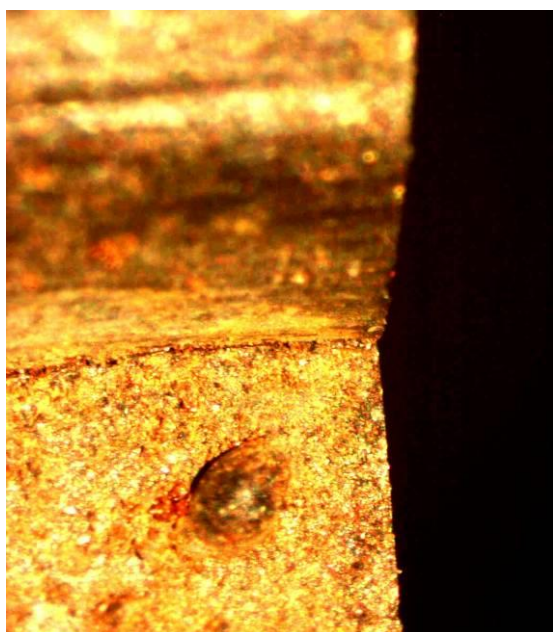
Obr. 3.26 Dva vzorky připravené pro analýzu lomové plochy

Na prvním vzorku je patrná trhlina v materiálu probíhající v radiálním směru, druhý vzorek je trhlinou rozdělen na dvě části, viz obr. 3.26.

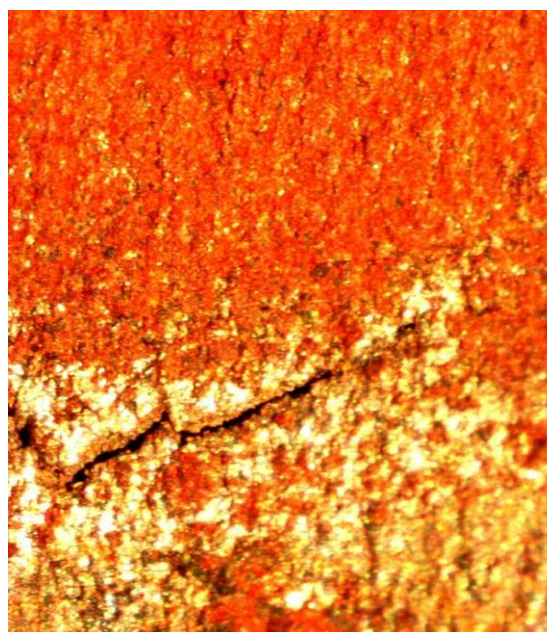
Pro analýzu lomové plochy byla z prvního vzorku odříznuta část v místě největšího rozevření trhliny, kde je předpoklad počátku jejího vzniku, u druhého vzorku byla studována lomová plocha po celé délce.

3.5.2 Vyhodnocení

Kontrolou prvního vzorku optickým mikroskopem LEICA Z16 APO bylo zjištěno, že zakončení trhliny z vnějšího povrchu leží mimo vzorek, viz obr. 3.27. Z vnitřního povrchu je pak stejná trhlina dokumentovaná na obr. 3.28. Oba snímky jsou 60x zvětšeny.



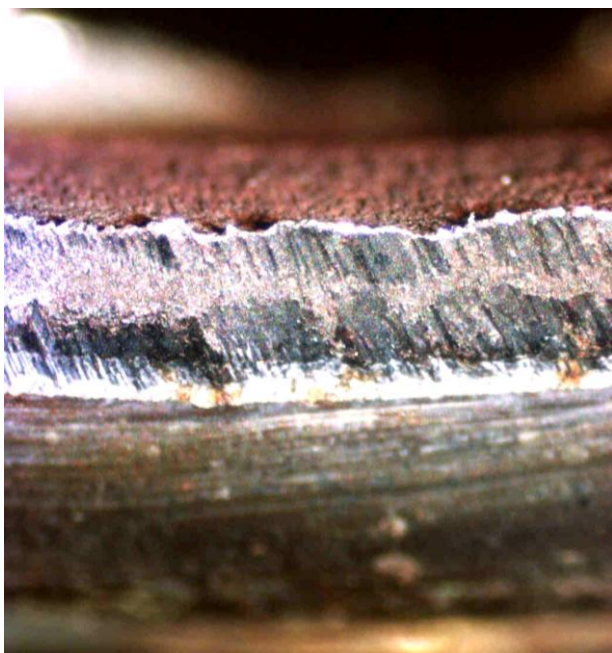
Obr. 3.27 Trhlina na vnějším povrchu 60x



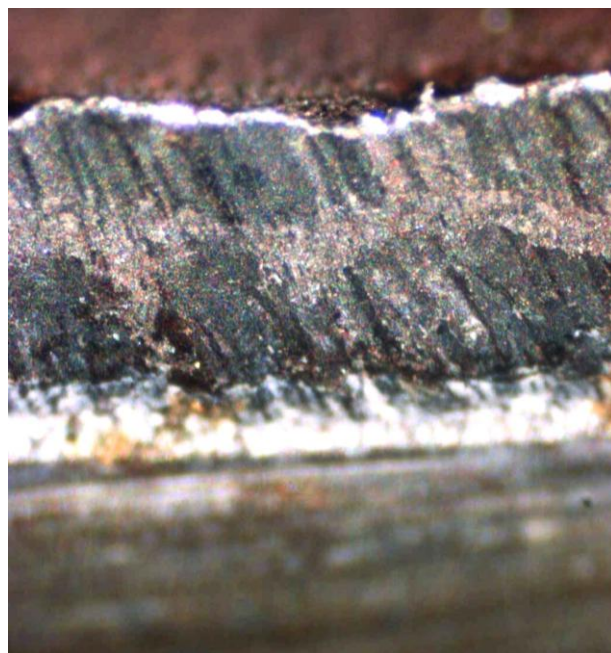
Obr. 3.28 Trhlina na vnitřním povrchu 60x



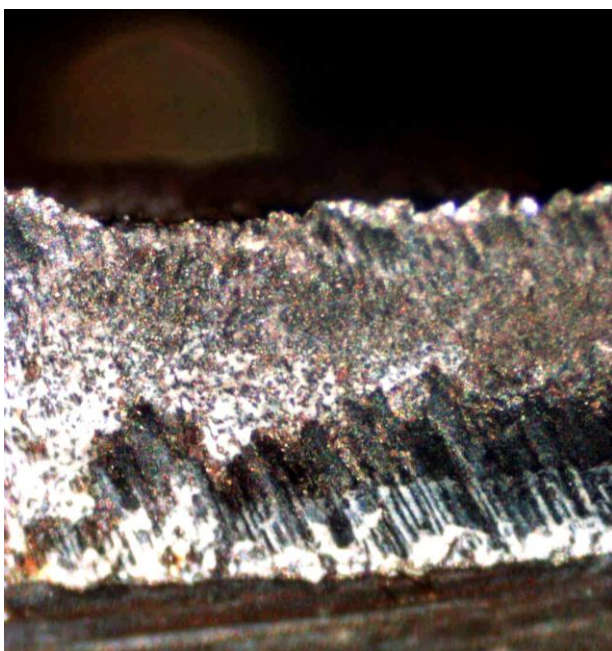
Lomová plocha je optickým mikroskopem LEICA Z16 APO dokumentovaná na druhém vzorku, který byl trhlinou rozdělen na dvě části, viz obr. 3.29 až 3.34. Z charakteru lomové plochy je zřejmé, že se jedná o postupný lom, který se šířil z obou povrchů součásti. Z obr. 3.29 lze usuzovat, že lom vznikl pravděpodobně nejprve v blízkosti vnějšího povrchu, následně se pak šířil od vnitřního povrchu. Dolomení nastalo ve střední části stěny trubky, viz obr.3.30.



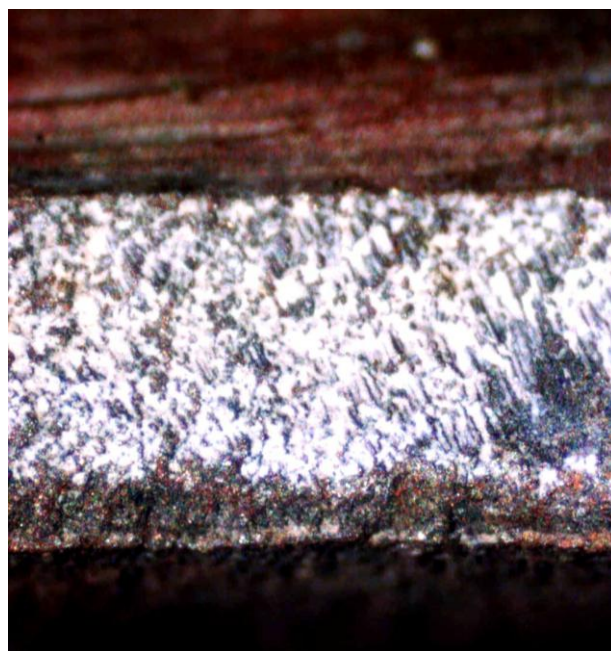
Obr. 3.29 Lomová plocha vzorku č.2 30x



Obr. 3.30 Lomová plocha vzorku č.2 60x

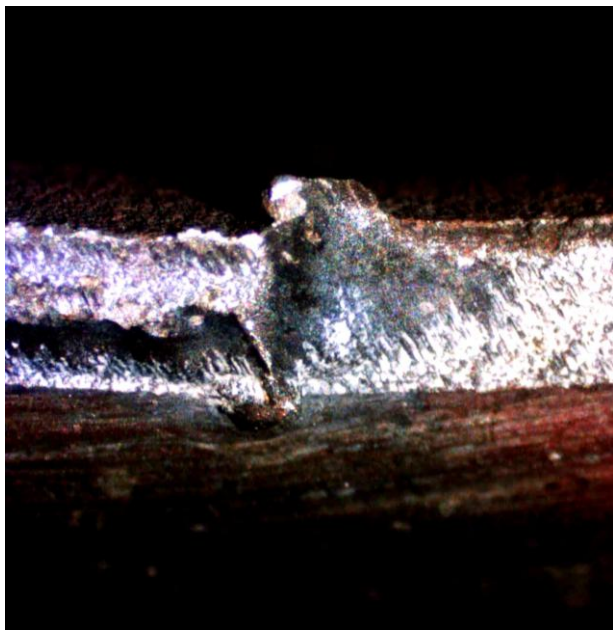


Obr. 3.31 Lomová plocha vzorku č.2 60x

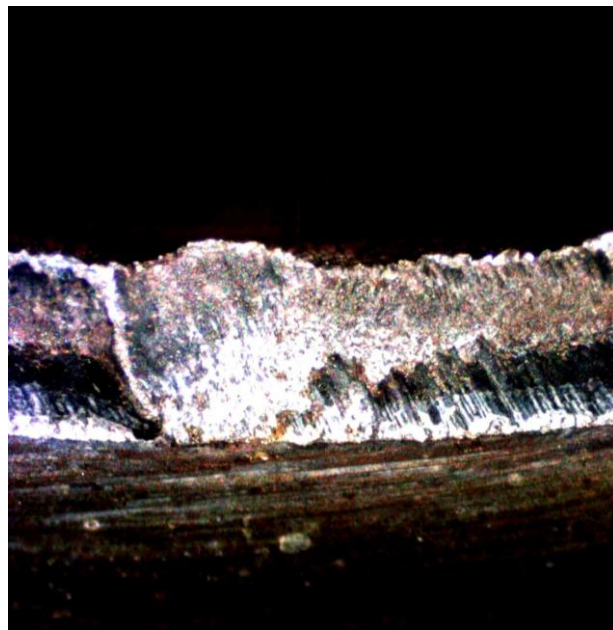


Obr. 3.32 Lomová plocha vzorku č.2 60x





Obr. 3.33 Lomová plocha vzorku č.2 30x



Obr. 3.34 Lomová plocha vzorku č.2 30x

O vzniku trhliny při provozním zatěžování svědčí i znečištění lomové plochy viz obr. 3.31 a 3.32.



4. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo posoudit různé příčiny porušení svodového potrubí, kde vznikla obvodová prasklina v hrdle samotného dílu. Díl pocházel z vozu, který byl testován v Jižní Africe, proto se dá předpokládat, že byl nadměrně zatěžován, aby se ukázala slabá místa vozu. Trhlina na svodovém potrubí vznikla přibližně po nájezdu 20 000 km. Pomocí několika analýz jsem se pokusil zjistit, nebo naopak vyvrátit některou z možností příčiny.

Jako první byla provedena analýza chemického složení materiálu pomocí spektrometru SPECTROTEST, kde bylo měřeno chemické složení obou komponentů, které byly spojeny svarovou housenkou a podél které vnikla trhlina. Dle výkresové dokumentace by měli být oba materiály z feritické korozivzdorné ocele 1.4509 dle evropské normy EN 10088-2-2005. Bylo provedeno deset měření na každém vzorku a z nich vypočítán aritmetický průměr, který pro mě představoval konečný výsledek. Po porovnání naměřených hodnot se standardem bylo zjištěno, že oba materiály odpovídají standardu a tudíž jsme mohli vyloučit hned několik možných příčin porušení. Například porušení vlivem nevhodného použití materiálu pro tento účel, nebo také porušení vlivem protisměrné difúze uhlíku, protože oba spojené materiály mají shodnou jakost a tudíž i obsah uhlíku.

V druhé analýze bylo provedeno ověření kvality svarové housenky s níž přímo souvisí nastavení parametrů svařování. Při vyhodnocování vzorků, jsem se zaměřil na požadavky, které stanovuje interní specifikace EED-S-PSE-0002. Tato specifikace je schválená zákazníkem pro vyhodnocování svarů na dílech pro něho vyráběné. Deseti násobné zvětšení i vyfotografování vzorků bylo provedeno mikroskopem LEICA Z16 APO, měření snímků potom v softwaru LEICA IM50 4.0. Po porovnání naměřených hodnot se specifikací můžeme konstatovat, že svarová housenka vyhovuje svou kvalitou v celé své délce. Proto můžeme vyloučit další příčinu porušení dílu a to porušení, kvůli přílišnému ovlivnění okolního materiálu přehnanými parametry, kde by vznikala nadměrná penetrace po obvodu na vnitřní straně dílu.

Třetí analýzou jsem se snažil prozkoumat mikrostrukturu v okolí praskliny a zjistit eventuelní nedokonalosti v materiálu. Pro tuto analýzu byly připraveny dva vzorky. Jeden z místa praskliny a druhý z místa, kde prasklina ještě nevznikla. Vyhodnocení struktury vzorků bylo provedeno pomocí mikroskopu LEICA Z16 APO s pomocným externím osvětlením LEICA KL1500 LCD. U prvního vzorku je zachycena trhlina, která se z hlavní lomové plochy větvila, což dokazuje, že materiál v těchto místech byl přetížen. U druhého vzorku nebyla pozorována žádná vada, která by měla vést k porušení materiálu. Dále můžeme



pozorovat napojení svarového kovu k podkladovému materiálu, které nevykazuje také žádné vady. Tato analýza nám vyvrátila možnou příčinu porušení dílu z důvodu vad mikrostruktury materiálu před i po zavaření v místě trhliny.

Poslední analýza lomové plochy reprezentativních vzorků, odebraných z místa trhliny měla přiblížit způsob, jakým trhlina vznikla. Tato analýza byla provedena pomocí optického mikroskopu LEICA Z16 APO. Na prvním vzorku bylo k vidění zakončení trhliny z (vnějšího) i vnitřního povrchu. Lomová plocha byla pozorována až na druhém vzorku. Z charakteru lomové plochy je zřejmé, že se jedná o postupný lom, který se šířil z obou povrchů součásti. Lze tedy usuzovat, že lom vznikl pravděpodobně nejprve v blízkosti vnějšího povrchu, následně se pak šířil od vnitřního povrchu. Dolomení nastalo ve střední části stěny trubky. Některé snímky zachytily i silně znečištěnou lomovou plochu vzorku. Z charakteru lomové plochy (postupného lomu) lze tedy přisuzovat nejpravděpodobnější příčinu porušení nesouosému namáhání dílu. Nesouosé namáhání mohlo vzniknout již při montáži neideální polohou některých z držáků, ale k samotné trhlině došlo až při působení vysokých teplot, vibrací a všech vlivů okolního prostředí, kterému byl díl vystaven za jeho krátké funkční období.

Tyto poznatky byly dále prezentovány zákazníkovi a také našemu vývoji. V sériové výrobě nebylo zatím potřeba dělat žádné změny, které by byly uskutečněny na základě získaných poznatků o tomto porušeném dílu. Nicméně je stále potřeba striktně dodržovat nastavené technologické postupy při výrobě tohoto dílu a sledovat kvalitu.

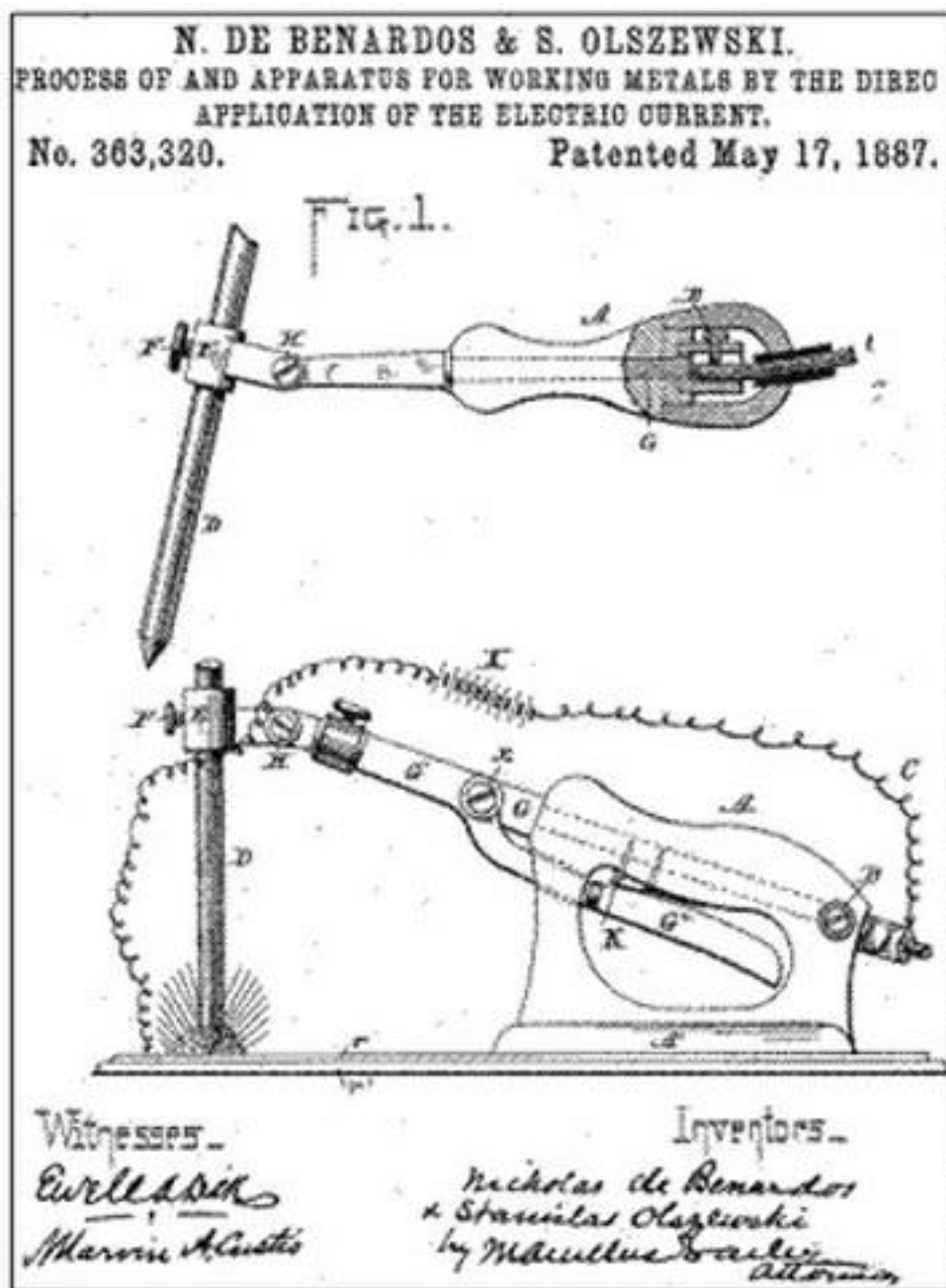


5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÁ, I. - NOVÁKOVÁ, I. - BRADÁČ, J.: *Technologie I* [Skripta]. FS- TU v Liberci 2006.
- [2] JOSEF KUNCIPÁL, J. a kol.: *Teorie svařování*. 1. vyd. Praha 1986.
- [3] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu I*. 1. vyd. Brno 2003.
- [4] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu II.1*. vyd. Brno 2002.
- [5] HLUCHÝ, M. - KOLOUCH, J.- PAŇÁK, R.: *Strojírenská technologie 2*, 1. díl, Praha 2001.
- [6] TMĚJ, J. - NEUMANN, H.- JENŠÍ, S.: *Teorie svařování*. [Skripta]. FS - VŠST Liberci 1990.
- [7] KOUKAL, J. - SCHWARZ, D. - HAJDÍK, J.: *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava 2009
- [8] FURBACHER, I.: *Lexikon ocelí*, 2007.
- [9] SPECTRO Application Report, No.MMA-2/1, Rev.0.
- [10] Koroziivzdorné oceli jako konstrukční materiály MM Průmyslové spektrum.
- [11] http://cs.wikipedia.org/wiki/Historie_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.
- [12] <http://www.toolscomp.cz/technologie/pohled-do-technologie-svarovani-mig-mag/>.
- [13] <http://www.toolscomp.cz/technologie/pohled-do-technologie-svarovani-tig/>.
- [14] <http://www.paru.cas.cz/lem/book/index.html>.
- [15] Výkres součástí.
- [16] <http://www.spectro.cz/store/spectrotest-ccd-brozura-cz.pdf>.
- [17] Katalog firmy STRUERS – Dokonalost v materiálografii.
- [18] Interní specifikace - Požadavky na svarové spoje EED-S-PSE-0002.
- [19] Výběr EN 10088-2-2005 Chemical composition of grade X2CrTiNb18 (1.4509)
- [20] <http://vosup.phorum.cz/doc/materialy1.pdf>.



6. PŘÍLOHA



Obr. P1 Ukázka patentu obloukového svařování Bernardose a Olszewskiho z roku 1887

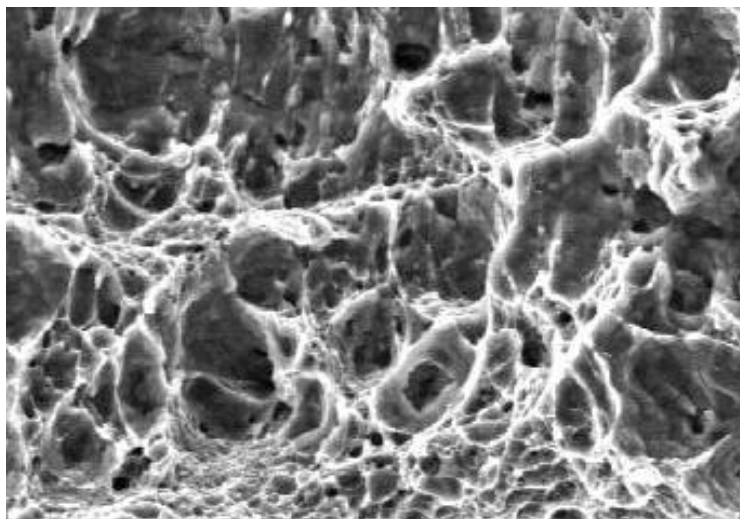




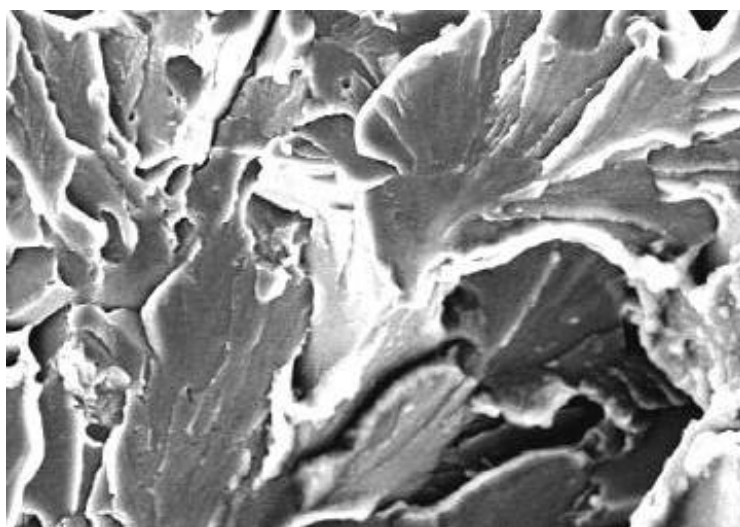
Obr. P2 Ukázka analyzovaného dílu v experimentální části



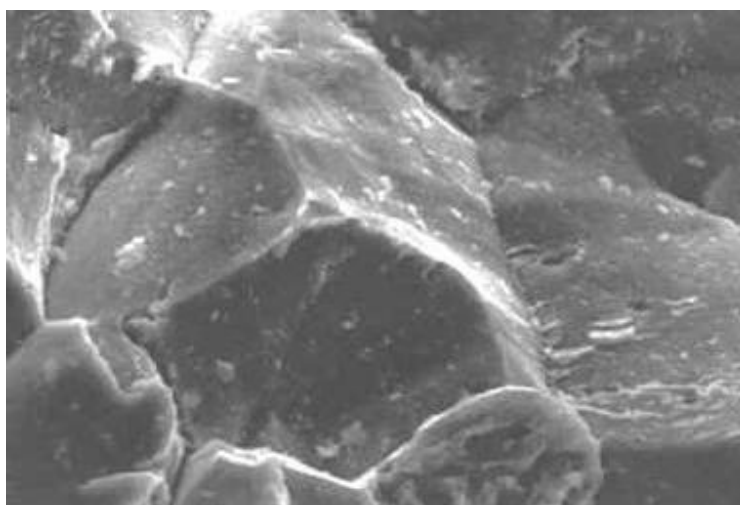
Obr. P3 Ukázka analyzovaného dílu v experimentální části



Obr. P4 Transkrystalický tvárný lom [20]



Obr. P5 Transkrystalický štěpný lom [20]



Obr. P6 Interkrystalický štěpný lom [20]

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon
Č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských
práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si plně vědom
povinnosti informovat o této skutečnosti TU v Liberci. V tomto případě má TU v Liberci
právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich
skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě
konzultací s vedoucím bakalářské práce.

Datum: 4. 1. 2013

Podpis:



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact. In this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 4. 1. 2013

Signature:

